



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Turbo sraigtinio variklio darbo ciklą analizė

Baigiamasis magistro studijų projektas

Kęstutis Grigaliūnas
Projekto autorius

Dr. Janina Jablonskytė
Vadovė

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Turbo sraigtinio variklio darbo ciklą analizė

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (621H40001)

Kęstutis Grigaliūnas
Projekto autorius

Dr. Janina Jablonskytė
Vadovė

Doc. dr. Robertas Keršys
Recenzentas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Kęstutis Grigaliūnas

Turbo sraigtinio variklio darbo ciklą tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Kęstučio Grigaliūno, baigiamasis projektas tema „Turbo sraigtinio variklio darbo ciklą tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Studijų programa .Aeronautikos inžinerija (621H40001), Inžinerijos mokslai

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO
UŽDUOTIS**

Studentui: Kęstučiui Grigaliūnui

1. Baigiamojo projekto tema

Turbo sraigtinio variklio darbo ciklų tyrimas

Raserch of working cycles of turbo prop engines

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Išanalizuoti nedidelės galios turbo sraigtinių variklių darbo ciklų pagrindinius parametrus, parengiant metodiką pagrindinių parametų nustatymui turbo sraigtinių variklių termodinaminiuose skaičiavimuose.

Uždaviniai:

1. Atlikti nedidelės galios turbosraigtinių variklių analizę.
2. Išanalizuoti darbo ciklus, vykstančius turbo sraigtiniuose varikliuose. Apžvelgti termodinaminius procesus, vykstančius turbo sraigtiniame variklyje.
3. Apžvelgti skaičiavimų metodikas, taikomas turbo sraigtinių variklių skaičiavimuose.
4. Atlikti tiriamojo variklio pagrindinių charakteristikų analizę, termodinaminiais skaičiavimais nustatant pagrindinius parametrus.
5. Parengti nedidelės galios turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodiką.

3. Pradiniai Projekto duomenys

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Išanalizuoti mažos galios trubo sraigtinius variklius. Pasiūlyti nedidelio variklio galios 350 kW konstrukcinę schemą. Pateikti mažos variklio galios skaičiavimo užduoties metodiką.

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis

Nenumatyta

7. Projekto konsultantai

Lekt. Nerijus Baublys

Magistrantas: Kęstutis Grigaliūnas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas dr. Janina Jablonskytė.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas. Janina Jablonskytė.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

ĮVADAS	13
1. NEDIDELĖS GALIOS TURBO SRAIGTINIŲ VARIKLIŲ ANALIZĖ	14
1.1. Istorinio turbinių variklių konstrukcijų vystimosi apžvalga.....	14
1.2. Turbo sraigtinių variklių raidos analizė.....	16
1.3. Mažos galios turbosraigtinių variklių vystymosi perspektyvos	19
2. AVIACINIŲ TURBININIŲ VARIKLIŲ DARBO CIKLŲ ANALIZĖ.....	24
2.1. Braitono darbo ciklo analizė.....	24
2.2. Forsažo proceso panaudojimo analizė.....	26
2.3. Regeneracijos proceso naudojimo novacija	28
3. TSV SKAIČIAVIMO METODIKOS APŽVALGA.....	35
3.1. Turbo reaktyvinio variklio parametrų skaičiavimo seka	35
3.2. Turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodikos apžvalga.....	37
3.3. Užsiduodamų parametrų pasirinkimo sekos.....	40
3.4. TSV vadymo ir reguliavimo dėsnių analizė	41
3.5. TSV mazgų bendro darbo skaičiavimų ypatumų analizė	43
4. NEDIDELĖS GALIOS TSV KONSTRUKCINĖS SCHEMOS PASIŪLIMAS.....	45
4.1. Skaičiavimo sąlygų pasirinkimas analizuojant variklio naudojimo sritis	45
4.2. Variklio parametrų parinkimas, analizuojant skaičiavimų rezultatus	45
4.3. Variklio valdymui reikalingų jutiklių komplekto analizė.....	50
4.4. Siūlomo variklio konstrukcijos masės analizė	55
5. NEDIDELĖS GALIOS TSV SKAIČIAVIMO UŽDUOTIES METODIKOS PARENGIMAS ..	57
DARBO IŠVADOS.....	62
LITRATŪROS SĄRAŠAS	63

Kęstutis Grigaliūnas. Turbo sraigtinio variklio darbo ciklų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas vadovė dr. Janina Jablonskytė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (621H40001), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: dujų turbininis variklis, darbo ciklas, regeneracija.

Kaunas, 2018. 65 p.

Santrauka

Darbe išanalizuota turbo sraigtinių variklių vystimasis, perspektyvos. Didelis dėmesys skiriamas naujai susiformavusio poreikio, mažų gabaritų nedidelės galios varikliams, analizei.

Darbe taip pat analizuojamas turbo sraigtinių variklių darbo ciklas ir papildomi ciklo procesai leidžiantys pagerinti terminį ciklo naudingumo koeficientą. Ši analizė apima procesus tobulinančius darbo ciklą dujų turbininiuose varikliuose, bei regeneracijos proceso įvedimą į ciklą, kuris tinka išskirtinai turbo sraigtiniams bei turbo veleniniams varikliams.

Darbe pateiktos dujų turbininių variklių termodinaminių parametrų skaičiavimo metodikos. Skaičiavimų ypatumai bei kylančios problemos. Lygiagrečiai atliktas nedidelės galios (350 kW) variklio skaičiavimai. Apibendrinant ir įvertinant šio skaičiavimo rezultatus, siūloma turbo sraigtinio variklio, kurio galia 350 kW, masė iki 100 kg, konstrukcinė schema.

Baigiamajame darbo skyriuje, kaip darbo praktinio pritaikymo būdas, pateikiama turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodika, skirta 3 – čio kurso aviacinių bakalauro programų studentams. Metodika padės atlikti savarankiško darbo užduotį ir leis geriau įsisavinti teorinę turbo reaktyvinių variklių modulio medžiagą.

Kestutis Grigaliunas. Raserch of working cycles of turbo prop engines. Master's Final Degree Project supervisor Janina Jablonskyte; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (621H40001), Engineering Science.

Keywords: gas turbine engine work cycle, regeneration.

Kaunas, 2018. 65 pages.

Summary

Development and perspectives of turboprop engines are analyzed in this thesis. Focuses to analysis of the newly emerging needs of lightweight low power engines in this work.

The work cycle of turboprop engines and additional cycle processes that improve the thermal efficiency of the cycle also analyzes in this work. This analysis includes processes that improve the working cycle in gas turbine engines, and the introduction of a regeneration process into a cycle that is suitable for turboprop and turbo-shaft engines.

This thesis presents the methodologies for calculating thermodynamic parameters of gas turbine engines. Calculations and emerging problems. Calculation of low power (350 kW) engine. Summarizing and evaluating the results of this calculation, of a turboprop engine with a mass up to 100 kg and power 350 kW are proposed a construction scheme.

A practical application of the work, the turboprop engine calculation methodology is provided for the 3rd year aviation undergraduate students which are shown in the final work section. The methodology will help to accomplish the task of self-study and will allow to better absorb the theoretical material of the gas turbine engines.

Paveikslų sąrašas

1.pav. Paveikslėlis iliustruojantis tiesioginio ir netiesioginio poveikio variklių sampratą.....	14
2.pav Termoemisinės aušinimo sistemos esmė.....	15
3pav. 3.2 MW galios vidausdegimo stūmoklinis variklis R4600.....	16
4pav. 3.6 MW galios turbo sraigtinis variklis AE 2100.....	16
5.pav Turbo sraigtinis variklis TP – 400.....	17
6.pav. Vienas iš 4-ių lėktuvo A-400M variklių TP-400.....	18
7pav. Turbo sraigtinis variklis PT – 6.....	18
8.pav Turbo sraigtinis variklis TFE – 331.....	19
9.pav Turbo sraigtinis variklis M – 601.....	19
10.pav. Turbo sraigtinis variklis su penkiamenčiu sraigtu.....	20
11.pav Mažagabaritis turbo sraigtinis variklis TP100.....	21
12.pav. Variklio TP100 erdvinis pjūvis.....	21
13.pav. Idealaus Braitono ciklo T – s diagrama.....	23
14.pav. Ciklo terminio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo suspaudimo laipsnio.....	24
15.pav. Turbo reaktyvinio variklio su forsažo kamera pjūvis.....	25
16.pav. Idealaus ciklo su forsažu T – s diagrama.....	26
17.pav. Variklio su regeneracijos šilumokaičiu schema.....	27
18.pav. Idealaus Braitono ciklo su regeneracija T – s diagrama.....	28
19.pav Specifinių degalų sanaudų kitimas priklausomai nuo regeneracijos laipsnio.....	30
20.pav. Terminio naudingumo koeficiento kitimas priklausomai nuo dujų temperatūros prieš turbiną.....	30
21.pav. Specifinių degalų sanaudų kitimas priklausomai nuo dujų temperatūros prieš turbiną.....	31
22.pav. Vamzdinio šilumokaičio schema.....	32
23.pav. Plokštinio šilumokaičio schema.....	32
24.pav. Vieno veleno TSV skaičiavimo schema.....	35
25.pav. TSV su laisvąja jėgos turbina skaičiavimo schema.....	35
26.pav. Siūlomo variklio konstrukcinė schema.....	47
27.pav. Termoelektrinio termometro schema.....	51
28.pav. Dujų srauto temperatūros jutikliai: a) 5-ių JTE porų; b) 5 JTE.....	52
29.pav. Magnetoindukcinio tachometro schema.....	53
30.pav. Vibracinio keitiklio schema.....	54
31.pav. TSV skaičiavimo schema.....	57

Lentelių sąrašas

1. lentelė. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis $H = 0$ m, greitis $0M$45
2. lentelė. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis 3000 m, greitis $0.3M$46
3. lentelė. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis 6000 m, greitis $0.5M$46

i. ŽYMĖJIMAI

W – darbas/ energija, [J/kg];
 π – suspaudimo laipsnis;
 p – slėgis, [Pa];
 T – temperatūra, [K];
 η – naudingo veikimo koeficientas,
 m – dvikontūriškumo laipsnis,
 a – garso greitis, [m/s]
 V – greitis, [m/s];
 k – adiabatės rodiklis,
 R – dujų pastovioji konstanta, [J/kg·K];
 q – santykinės savitosios degalų sanaudos;
 C_e – santykinės sanaudos,
 δ – santykinės oro sąnaudos variklio reikmėms,
 σ – slėgio atsistatymo koeficientas,
 N – galia, [e. W]
 c_p – šiluminis talpumas, [J/kg·K];
 H_U – mažiausias degalų koloringumas, [kJ/kg];
 s - entropija
 $c_{p_{cp}}$ – šiluminis talpumas degimo kameroje, [J/kg·K];
 ΔK_y – kompresoriaus stabilumo atsarga, [%].

ii. INDEKSŲ REIKŠMĖS

- a – aplinka,
- 2 – pjūvis prieš kompresorių,
- 3 – pjūvis už kompresoriaus,
- 4 – pjūvis prieš turbiną,
- 5 – pjūvis už turbinos,
- 6 – pjūvis už laisvosios jėgos turbinos,
- 7 – išmetimo tūtos pabaiga,
- k – kompresorius,
- t – turbina,
- d.k – degimo kamera,
- ljt – laisvoji jėgos turbina,
- tut – išmetimo tūta,
- d.g – dujų generatorius,
- or – oras,
- d – dujos,
- auš – aušinimui,
- mech – mechaninis,
- ter – terminis,
- ad – adiabatinis,
- e – efektyvusis,
- sant – santykinis.
- e. a. g. – ekvivalentinės arklio galios

IVADAS

Mažos galios turbo sraigtinių variklių kūrimo bei gamybos vystymo problemoms spręsti yra sudaryta Europos Sąjungos programa, kuriai skiriamas nemažas biudžetas. Programoje dalyvauja 42 partneriai iš 15 Europos Sąjungos šalių, tarp jų yra 10 universitetų. Programos koordinatore paskirta bendrovė „PBS vielka Biteš“ iš Čekijos.

TSV netiesioginio poveikio reaktyvinis variklis, kuriame reaktyvinė trauka yra konvertuojama į sraigto veleno galią, o orlaivio judėjimui reikalinga traukos jėga yra generuojama oro sraigto pagalba. Oro sraigčiai gali būti naudojami tiek traukiantys tiek stumiantys. Didelės galios TSV yra įprastas reiškinys šiandienos aviacijoje. Atsirado jie kaip ekonomiškesnė pirmųjų turbo reaktyvinių variklių alternatyva. Šiandiena besivystanti bendrosios paskirties aviacija ir bepiločių orlaivių aviacija reikalauja platesnės turbo sraigtinių variklių gamos tiek galios, tiek matmenų ir masės atžvilgiu tyrimų.

Tikslas. Išanalizuoti nedidelės galios turbo sraigtinių variklių darbo ciklą pagrindinius parametrus, parengiant metodiką pagrindinių parametru nustatymui turbo sraigtinių variklių termodinaminiuose skaičiavimuose.

Uždaviniai:

1. Atlikti nedidelės galios turbo sraigtinių variklių analizę.
2. Išanalizuoti darbo ciklus, vykstančius turbo sraigtiniuose varikliuose. Apžvelgti termodinaminius procesus, vykstančius turbo sraigtiniame variklyje.
3. Apžvelgti skaičiavimų metodikas, taikomas turbo sraigtinių variklių skaičiavimuose.
4. Atlikti tiriamojo variklio pagrindinių charakteristikų analizę, termodinaminiais skaičiavimais nustatant pagrindinius parametrus.
5. Parengti nedidelės galios turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodiką.

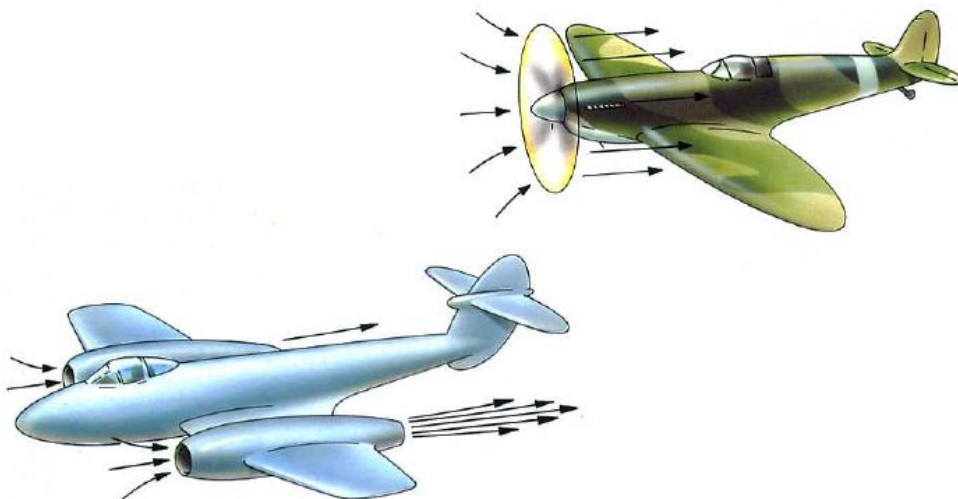
1. NEDIDELĖS GALIOS TURBO SRAIGTINIŲ VARIKLIŲ ANALIZĖ

1.1. Istorinio turbinių variklių konstrukcijų vystimosi apžvalga

Turbo reaktyvinis variklis - tai variklis, kuriame judėjimui sukurti reikalinga traukos jėga, sukuriama keičiant vidinę degalų energiją į kinetinę reaktyviniu srautu ištekancio darbo kūno energiją. Sutinkamai su energijos impulso tvermės dėsniumi, iš variklio tūtos dideliu greičiu ištekantis darbo kūnas, sukuria reaktyvinę jėgą, kuri stumia variklį į priešingą pusę.

Veikiančią jėgą galima padidinti, didinant srauto greitį arba masę. Bet masės padidinimas iššaukia degalų sanaudų didėjimą.

Čia galima pažymėti, kad visus transporto priemonėse naudojamus variklius galima suskirstyti į tiesioginio poveikio ir netiesioginio poveikio. Tiesioginio poveikio variklių grupei priskiriami tie varikliai, kuriuos sumontavus transporto priemonėje, norint jai suteikti judėjimą nebereikalinga naudoti kitų papildomų mazgų ir mechanizmų pvz. transmisijos, ratų, vikšrų, oro ir vandens sraigtų. Pastarojo tipo variklių įvairovė nėra didelė. Šiai grupei galima priskirti raketinius ir turboreaktyvinius (vieno, dviejų kontūrų; vieno, dviejų, trijų velenų; be forsazo kameros, su forsazo kamera), bekompresorinius (pulsuojantys tiesiasroviai) bei kombinuotus variklius (raketiniai – turbininiai, turbo – tiesiasroviai varikliai) [33].



1.pav. Paveikslėlis iliustruojantis tiesioginio ir netiesioginio poveikio variklių [22]

Netiesioginio poveikio variklių įvairovė gerokai didesnė. Šiai grupei galima priskirti elektros variklius, vidaus degimo stūmoklinius variklius, Vankelio variklius, garinius variklius ir t.t. Atskirai reikia pažymėti, kad šiai variklių grupei priskiriami ir kai kurie tipai dujų turbininių (kompresorinių) variklių; tai turbo sraigtiniai ir turbo veleniniai varikliai [33].

Pastaruosiuose varikliuose reaktyvinė tūta reorganizuota tokiu būdu, kad kurtu minimalią reaktyvinę srovę arba jos visai nekurtų, o visa dujų srauto energija yra verčiama veleno galia. Turbo

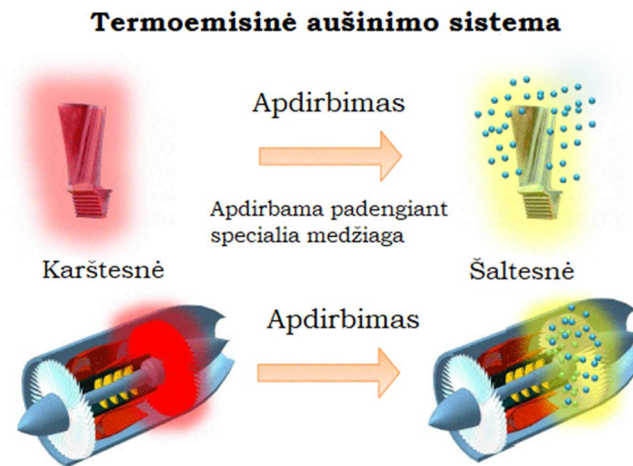
sraigtinis variklis yra dar pereito amžiaus pirmoje pusėje atrodžiusios idealia poros, oro sraigtas – vidaus degimo variklis, atkartojimas naujame technologiniame lygmenyje. Turbo veleninų variklių naudojimas yra itin platus transporte, pramonėje, energetikoje. Aviacijoje šio tipo varikliai išskirtinai naudojami sraigtasparniuose ir labai dažnai supaprastintai vadinami sraigtasparnių varikliais. Išskirtiniai šių variklių pažymiai:

- a) nekomplektuojami reduktoriais;
- b) neturi reaktyvinių tūtų (įvairios konfigūracijos ir ilgio įprasti išmetimo vamzdžiai, išvedantys darbinės dujas už sraigtasparnio borto).

Be to pastarieji varikliai naudojami karinėje technikoje bei jūrų transporte. Šiandien dujų turbininių variklių tobulėjimo perspektyvos nėra pilnai išnaudotos ir matomai dar ilgai jie liks pagrindiniais varikliais aviacijos transporte. Kaip buvo minėta jų galią galima padidinti didinant ištekencio dujų srauto greitį bei masę. Ekonomiškiausia šių variklių konstrukcinė schema yra dvikontūriai varikliai, tai varikliai kuriose darbinės dujos teka dviem kontūrais. Srautas suskirstytas į dvi dalis: karštą ir šaltą. Karštoji dujų dalis masės požiūriu mažesnė nei šaltoji. Šiandien santykis tarp šaltosios ir karštosios dalies gali siekti 10 ir daugiau. Beje tyrimu metu paaiškėjo atrodo paradoksaliausias dalykas, kad didelės masės šaltam srautui suteikti didesnę tekėjimo greitį yra paprasčiau nei mažesnės masės karštam srautui. Iš to formuojasi viena šių variklių tobulinimo kryptis dvikontūriškumo laipsnio didinimas. Jau yra eksperimentinių variklių, kuriuose šis parametras pasiekia $20 \div 30$ ir net 50 kai naudojami nedengti sraigčiai ventiliatoriai [22].

Dujų turbininiai varikliai veikia naudojant darbo ciklą su šilumos įvedimu esant pastoviam slėgiui, dar šis ciklas vadinamas paprastuoju reaktyviniu ciklu arba Braitono ciklu. Aviaciniuose varikliuose į šio ciklo sudėtį nedažnai įvedami papildomi į gerinantys procesai. Iš papildomų procesų dažniausiai naudojamas, ir beveik išskirtinai karo aviacijoje, papildomas šilumos įvedimas plėtimosi proceso metu arba forsažas. Pramoniniuose dujų turbininiuose varikliuose naudojama daugiau pridėtinių darbo ciklo elementų. Taigi antra vystymosi kryptis, darbo ciklo procesų tobulinimas. Trečia perspektyvi tobulinimo kryptis tai darbinė dujų temperatūros didinimas prieš turbiną.

Yra žinoma, kad, sudeginant vieną degalų masės, esant tam tikram oro pertekliaus koeficientui, galima gauti iki 2400° K temperatūrą. Dabar geriausiuose variklių modeliuose šis parametras tesiekia $1600 \div 1700^{\circ}$ K ribą. Tas lygis yra nulemtas medžiagų, iš kurių gaminamos turbinų detalės savybėmis, bei šių detalių aušinimo sistemų efektyvumu [3].



2.pav. Termoemisinės aušinimo sistemos esmė [15]

Temperatūros didinimas prieš turbiną leidžia gerinti ekonomiškumą bei mažinti teršalų kiekius išmetamųjų dujų sudėtyje.

Preita prie išvadų, kad aušinimo oru sistema negali pasiekti reikiamo efektyvumo, jau dabar sukaupti eksperimentiniai duomenys įrodo, kad termo emisinė aušinimo sistema gali būti 30 ÷ 40 kartų efektyvesnė nei orinė aušinimo sistema. Trumpai tokios aušinimo sistemos veikimui reikalinga specialiomis medžiagomis padengti didelių temperatūrų zonose dirbančias detales.

Ieškoma ir naujų konstrukcinių schemų, kurios leistu naudoti hibridines schemas t.y. atskiroms turbinų dalims suteikti papildomos energijos naudojant elektros variklius [15].

Keletą kraštinių metų gana aktyviai formuojasi nauja dujų turbininių variklių naudojimo sritis aviacijoje, tai mažos galios nedidelės masės bei gabaritų variklių skirtų bendrosios paskirties aviacijai. Gerai išstobuline didelių komercinių lėktuvų variklius, projektuotojai nukreipė savo žvilgsnius ir į „mažąją aviaciją“. Kita aviacijos kryptis kur galimas tokių turbosraigtinių variklių panaudojimas vidutinės bei didesnės masės bepiločiai orlaiviai. Jau egzistuoja keletas nedidelės galios apie 200 kW ir apie 70 kg masės, eksperimentinių pavyzdžių. Projektavimo stadijoje yra dar keletas pavydžių, kuriuose norima įgyvendinti darbo ciklą su regeneracija.

1.2. Turbo sraigtinių variklių raidos analizė

Turbo sraigtiniai varikliai buvo suprojektuoti, kaip ekonomiškė alternatyva turbo reaktyviniams varikliams. Išsaugoję didžiausius reaktyvinių variklių privalumus, jie pasižymėjo ženkliu ekonomiškumu lyginant su pirmaisiais turbo reaktyviniais varikliais. Pirmi reaktyviniai

keleiviniai laineriai be tarpinio tūpimo negalėdavo įveikti Atlanto vandenyno, be to reaktyvinis variklis nepilnai atitiko ir karinės transporto aviacijos poreikius. Čia vėl buvo gryžta prie oro sraigto arba propelerio idėjos [22].

Tik dabar jam sukti, vietoje įprasto stūmoklinio vidaus degimo variklio, buvo pasitelkta dujų turbina. Iš to galima padaryti keletą išvadų: turbosraigtinis variklis ekonomiškesnis nei turboreaktyvinis variklis, šis variklis yra netiesioginio poveikio variklis t. y. traukos realizacijai reikalingas propeleris, būdamas tokios pat galios kaip stūmoklinis variklis turbosraigtinis variklis yra gerokai mažesnių geometrinių matmenų, bei ženkliai mažesnės masės.



3.pav. 3.2MW galios stūmoklinis variklis R4600 [31]

Pavyzdžiui 3 ÷ 3.5 MW galios stūmoklinio variklio masė artėja prie 4000 kg, tai analogiškos galios turbosraigtinio variklio masė ne viršija 1000 kg.

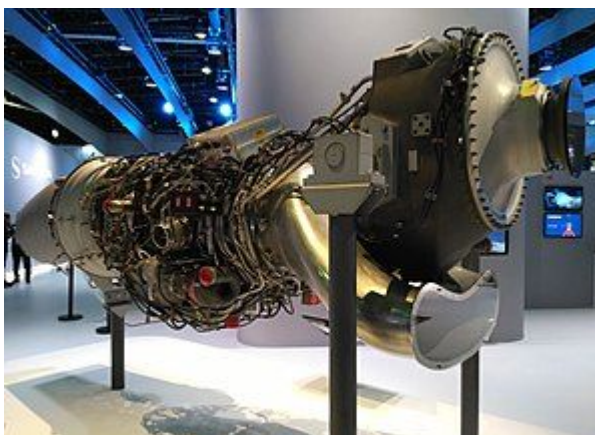


4. pav. 3.6 MW galios turbosraigtinis variklis AE - 2100

Be to šiuose varikliuose kaip degalai naudojamas aviacinis žibalas, o ne brangus aviacinis benzinas kaip vidaus degimo varikliuose. Tiesa turbosraigtinių variklių naudojimas turi ytakos skridimo greičiui. Lėktuvai su tokiais varikliais yra lėtesni nei lėktuvai naudojantys turboreaktyvinius

variklius. Greičiausi turbosraigtinius variklius turintys lėktuvai pasiekia $700 \div 800$ km/val greitį, tačiau įprastai pastarasis neviršija 600 km/val.

Didžiausi konstrukciniai turbosraigtinių variklių skirtumai lyginant su turboreaktyviniais varikliais yra: propeleris, reduktorius, kitokia išmetimo sistema, nenaudojama reaktyvinė tūta. Žymesnių konstrukcinių skirtumų gali turėti ir kompresorius. Čia dažnai naudojama mišri konstrukcija, kai viename kompresoriuje naudojami ir ašiniai ir išcentriniai darbo ratai. Tokia mišri konstrukcija leidžia turėti pakankamai didelį adiabatinio naudingumo koeficientą bei didelį suspaudimo koeficientą. Tuo pat metu mažėja kompresoriaus ilgio matmuo ir masė. Kadangi turbosraigtinių variklių pagrindu dažniausiai būna vieno kontūro dujų generatoriai, tai mišraus tipo kompresorių naudojimas leidžia supaprastinti kompresoriaus mechanizacijos sistemas. Čia kalbama apie statorinių



5.pav. Turbo sraigtinis variklis TP – 400 [26]

pakopų mentelių pasukimo ir oro perleidimo sistemas [23].

Pagal konstrukcinius požymius šiuos variklius galima skirstyti į keletą grupių. Pavyzdžiui vieno ar dviejų kontūrų; su ašiniu kompresoriumi; su išcentrinu kompresoriumi, su kombinuotu kompresoriumi, su laisvąja jėgos turbina ar be jos.

Kaip jau buvo paminėta šiandiena labiausiai išstobulinti yra dideli galingi turbosraigtiniai varikliai. Absoliučiu rekordininku galios požiūriu yra laikomas rusiškas turbosraigtinis variklis NK – 12 M,



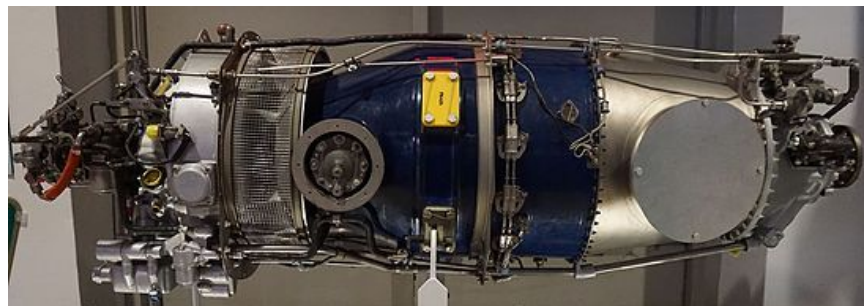
6.pav. Vienas iš 4-ių lėktuvo A - 400 variklių TP – 400[27]

kurio galia 15000 e. a. g. (11 185.5 kW). Jis yra komplektuojamas dvieliu birotatyviniu oro sraigtu. Panašios galios yra ir ukrainietiškas D – 27. Šio variklio galia 14000 e. a. g. (10439,8 kW). Čia naudojamas dvielis sraigtas vetiliatorius. Priekinis sraigtas turi 8 mentes, o galinis 6. Sraigtas taip pat birotatyvynis. Šio variklio dvikontūriškumo laipsnis 50. Galingiausias variklis naudojantis vieneilį sraigta yra TP – 400, galia 11000 e. a. g. (8200 kW), naudojamas lėktuvuose A – 400 M. Gamintojas koncernas „Europrop International“ (pav. 5, 6).

Autoritetinga kompanija gaminanti turbosraigtinius variklius yra „Pratt & Whitney of Canada“. Šiandien šios kompanijos gaminamos variklių serijos PW – 100, PW – 120, PW – 150 labai plačiai naudojamos komercinėje aviacijoje. Tai variklių šeimos naudojamos regioninių turbo sraigtinių lėktuvų ATP, ATR ir Bombardier Q – 400 jėgainėse. Galia iki 4500 kW.

1.3. Mažos galios turbosraigtinių variklių vystymosi perspektyvos

Iš dabar gaminamų turbosraigtinių variklių mažiems priskiriami „Pratt & Whitney“ šeimos PT 6 (pav. 7) lengvoji serija, kur galia varjuojama nuo 500 iki 750 e. a. g.. Šių variklių masės nuo 180 iki 195 kg. Labai plačiai naudojami varikliai“.[24]



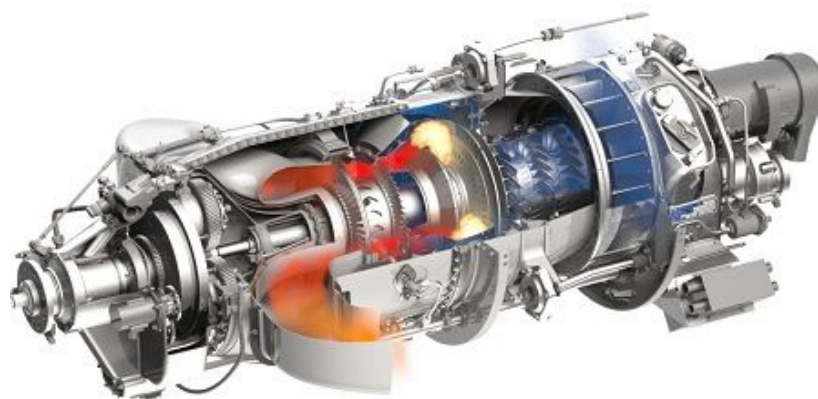
7.pav. Turbo sraigtinis variklis PT – 6[24]

„Honeywheel“ TFE – 331 variklių (pav.8) šeima susideda iš 720 ÷ 1100 e. a. g. modelių, kurių masė 120 – 160 kg.



8.pav. Turbo sraigtinis variklis TFE – 331 [28]

Didžiausias skirtumas nulemiantis masių skirtumą šiuose varikliuose tas, kad variklyje PT – 6 naudojamas daugiapakopis mišrios konstrukcijos kompresorius, o variklyje „TFE“ panaudotas dviejų pakopų išcentrinis kompresorius.



9.pav. Turbo sraigtinis variklis M- 601 [30]

Gerai žinomas ir čekiškas M – 601 „Walter“ (pav. 9). Tai varikliai kurių galia nuo 540 iki 750 e.a.g., masė apie 200 kg. Naujausios modifikacijos galia pakelta iki 820 e.a.g.

Rinkoje bando įsitvirtinti ir ukrainiečių kompanija „Motor Sich“ su varikliu MS – 450 (pav. 10),



10.pav. Turbo sraigtinis variklis MS-450 su penkiamenčiu sraigtu [29]

kuris siūlomas ir turbosraiginiame ir turbo veleniniame variantuose. Galia nuo 500 iki 750 e.a.g., masė 130 – 150 kg.

Bendri konstrukciniai bruožai visiems paminėtiems varikliams yra šie: a) schema su laisvąja jėgos turbina, b) ir turbo generatoriaus ir laisvoji jėgos turbinos ašinės, c) degimo kameros žiedinės, d) reduktoriai planetinio tipo. Daugiausiai skirtumų kompresorių konstrukcijose, reduktoriaus integravimo schemose bei valdymo sistemų tipuose. Plačiai naudojami mišrios konstrukcijos kompresoriai, kur derinama keletas ašinių pakopų ir viena išcentrinė pakopa kompresoriaus gale. Tokios schemas kompresoriai panaudoti varikliuose „PT“, M – 601. Varikliuose „TFE“ ir „MS“ panaudoti išcentrinio tipo kompresoriai. Vienu atveju dviejų pakopų, kitu – vienos pakopos. Varikliuose „PT“, M – 601, MS reduktoriai yra integruoti į variklio korpusą. Variklyje TFE reduktorius yra išskeltas. Būtent dėl šios įpatybės varikliai „PT“ ir „Walter“ yra sukomponuoti naudojant taip vadinamą apversto variklio schemą. Variklyje „TFE“ siekiant sumažinti ilgio matmenį panaudota ir prieš srovinė degimo kamera. Šių variklių valdymo sistemos arba hidromechaninė arba skaitmeninės FADEC tipo.

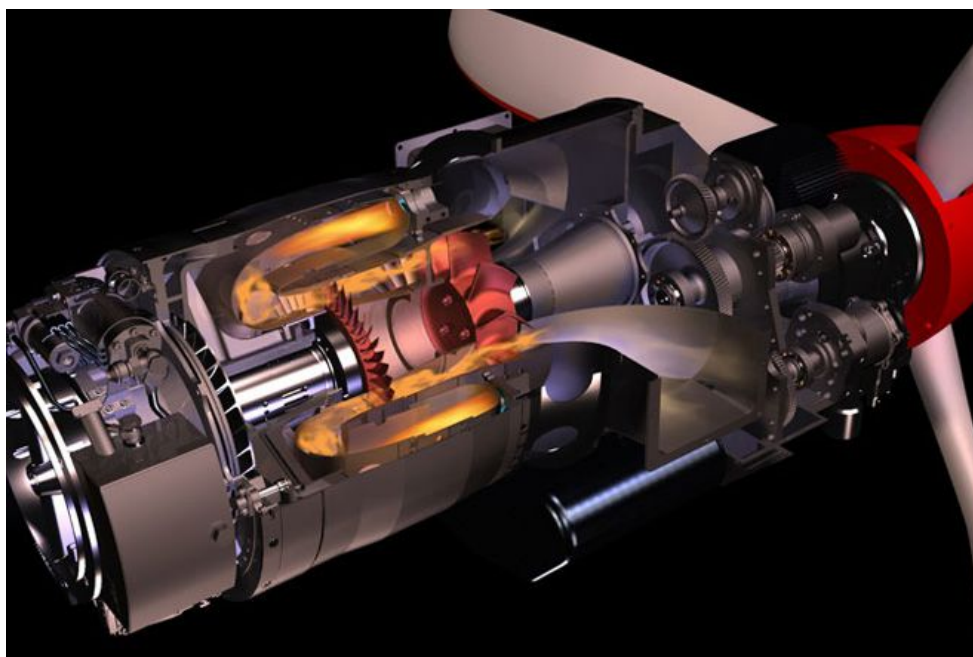
Ilgą laiką šie varikliai ir buvo mažiausi turbosraiginių variklių egzemplioriai, lyginant su didesniais įprastais turbosraiginiais varikliais. Dabar pradėjo formuotis dar mažesnių variklių pasiūla. Kaip labai sėkmingą ir naują pavyzdį galima paminėti čekišką TP100 (pav. 11) variklių šeimą. Tai



11.pav. Mažagabaritis turbo sraigtinis variklis PBS TP100 [24]

kompanijos PBS iš Vielka Bitešo. Tai 180 kW galios, 62 kg masės variklis. Siūlomas ir turbo sraigtiniame ir turbo veleniniame variante. Variklį galima naudoti iki 9000 m aukščio.

Varikliai yra nedidelių matmenų 891 x 398 x 330 mm. Negalima neatkreipti dėmesio ir į šio variklio masės galios santykį, kuris yra 2.92 e.a.g./kg. Palyginimui analogiškas parametras vidausdegimo stūmoklinių analogiškos ar labai artimos galios variklių yra 1.67 – 1.31 e. a.g./kg.



12.pav. Variklio TP100 erdvinis pjūvis [25]

Tokio tipo variklių projektavimas tik prasideda ir serijinių pavyzdžių nėra daug. Europos Sąjungoje veikia programa ESPOSA (Efficient Systems and Propulsion for Small Aircraft). Programos biudžetas 37.7 mln. Eur. Programoje dalyvauja 42 partneriai iš 15 Europos Sąjungos šalių, jų tarpe 10 universitetų. Pagrindinis programos koordinatorius yra Akcinė bendrovė PBS Vielka

Biteš. Ji yra sukaupusi didelę patirtį mažagabaričių turboreaktyvinių bei turbosraigtinių variklių projektavime. Bendrovėje dirba apie 300 darbuotojų, metinės bendrovės pajamos apie 25.5 mln. Eur [25].

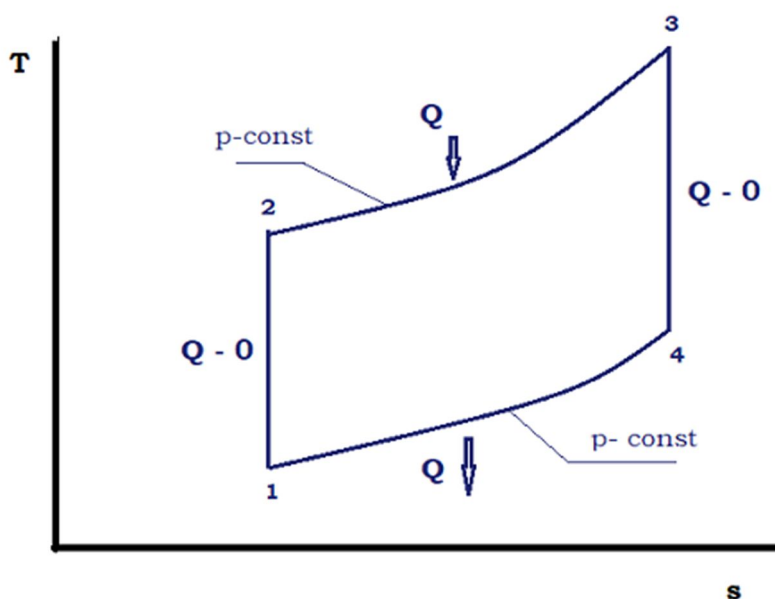
TP100 serijos varikliai yra labai universalūs montavimo orlaivyje požiūriu, jau projekto lygyje buvo numatyta galimybė naudoti ir traukiančius ir stumiančius sraigtus. Jie tinka naudoti lengvuose ir ultra lengvuose orlaiviuose bei bepiločiuose orlaiviuose.

2. AVIACINIŲ TURBININIŲ VARIKLIŲ DARBO CIKLŲ ANALIZĖ

2.1. Braitono darbo ciklo analizė

Plačiausiai paplitęs turboreaktyvinių variklių darbo ciklas yra Braitono ciklas, kitaip šis ciklas yra vadinamas ciklu su šilumos įvedimu, esant pastoviam slėgiui, taip pat kartais šis ciklas yra vadinamas paprastuoju reaktyviniu ciklu. Kaip matome pradinio stovio kūnas suspaudžiamas adiabatiniame procese 1 – 2 (pav. 13). Tada atkarpoje 2 – 3 suteikiamas šilumos kiekis q_1 . Atkarpoje 3 – 4 darbo kūnas plečiasi iki slėgio p_4 , kuris lygus pradiniam slėgiui p_1 . Šilumos atėmimas vyksta galutiniame izobariniame etape 4 – 1, ko pasekoje darbo kūnas sugrįžta į pirminius parametrus. Taip atrodo idealus teorinis ciklas, kuriame neįvertinami įvairūs nuostoliai [3].

Realaus ciklo diagrama



13.pav. Įdealaus Braitono ciklo T-s diagrama [1]

ganama netgi neuždara. Tai atspindi nuostolių realiame cikle poveikį. Braitono ciklo tirinėjimui reikalinga žinoti darbo kūno parametrus (k, R) išeities taške. Suspaudimo laipsnį (π) adiabatiniame procese. Ir darbo kūno pašildymo laipsnį ($\Delta = T_3 / T_1$). Ciklo terminio naudingumo koeficientas apskaičiuojamas naudojantis formule:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2.1.1)$$

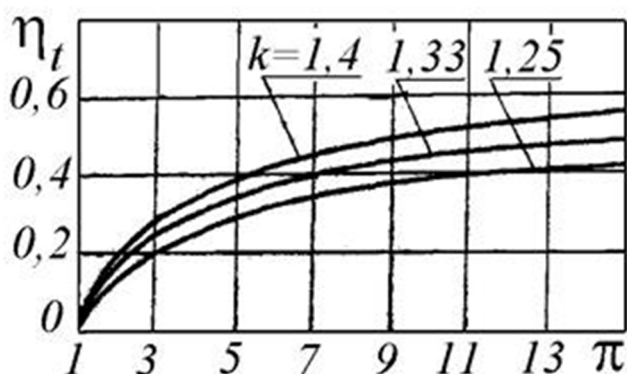
čia:

η_t - terminio naudingumo koeficientas;

π – ciklo suspaudimo laipsnis;

k – adiabatės rodiklis.

Žemiau pateikiamas grafikas leidžiantis spręsti, nuo ko priklauso ciklo terminis naudingumo



14.pav. Ciklo terminio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo suspaudimo laipsnio ir adiabatės rodiklio [23]

koeficientas. Ciklo darbas skaičiuojamas naudojant sekančią formulę:

$$W = q_1 - q_2 = \frac{c_p T_1}{e} \cdot (e - 1) \cdot (\Delta - 1) = \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot RT_1 \cdot (e - 1) \cdot \left(\frac{\Delta}{e} - 1\right) \quad (2.1.2)$$

Ciklo darbo dydis priklauso nuo darbo kūno tipo (k, R), jo pradinės temperatūros T_1 , suspaudimo laipsnio ir darbo kūno sušildymo laipsnio Δ . Kai didėja c_p, T_1, Δ ; didėja ir ciklo darbas [8].

Ciklo darbas yra lygus nuliui, kada π reikšmės atitinka dviems lygybėms: $e = 1$ ir $e = \Delta$. Minėtoje formulėje dėl užrašymo supaprastinimo:

$$\dots e = \pi^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.1.3)$$

Taigi tarp kraštinių reikšmių egzistuoja tokia π , reikšmė, kai ciklo darbas įgyja didžiausią reikšmę. Bet tada terminis ciklo naudingumo koeficientas nėra pats didžiausias. Taigi kaip jau buvo minėta šiandienai šis ciklas yra plačiausiai naudojamas aviaciniuose dujų turbininiuose varikliuose. Drąsiai galima teigti, kad šiuo ciklu yra paremtas visų aviacinių turbininių variklių darbas. Taip pat šiuo ciklu yra pagrįstas ir pramoninių bei jūrinių dujų turbininių jėgainių darbas. Ir jei aviacinėse jėgainėse nėra naudojama daug papildomų procesų ciklo darbo efektyvumui pakelti, tai pramoninėse bei laivų jėgainėse, kur nėra tokių griežtų reikalavimų masei bei užimamam tūriui, prie ciklo yra derinama visa eilė papildomų procesų. Galima paminėti tarpinius darbo kūno aušinimą, rekuperaciją ir kt. Aviacinių

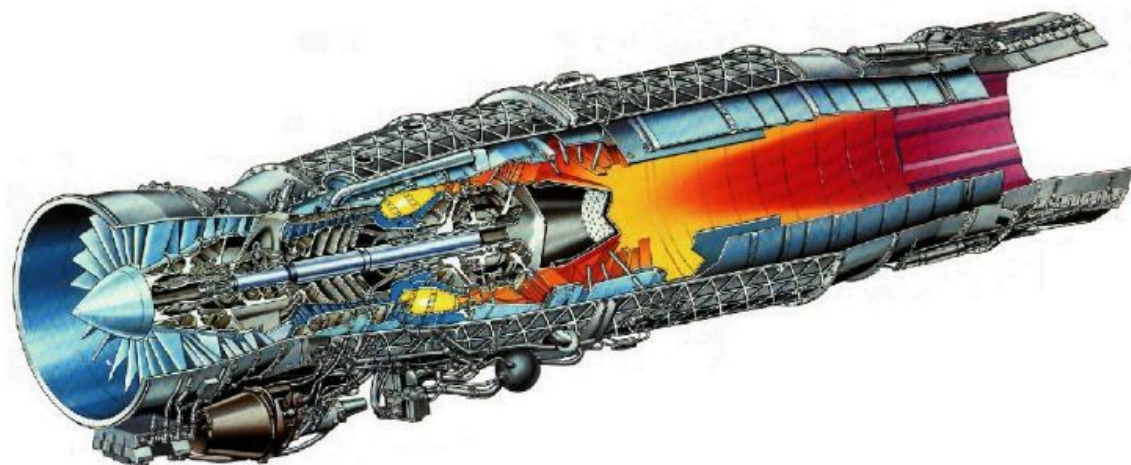
variklių tarpe papildomų procesų, pridedamų prie ciklo, sąrašas nėra didelis. Plačiausiai žinomas ir naudojamas yra forsažo procesas, t. y. papildomos šilumos įvedimas plėtimosi procese. Galima teigti, kad apšildymas tai išskirtinai naudojama didelių greičių kovinėje aviacijoje [5].

2.2. Forsažo proceso panaudojimo analizė

Forsažo naudojimas leidžia trumpam laikui ženkliai padidinti turboreaktyvinių variklių trauką. Tačiau tuo pat metu labai greitai didėja degalų sanaudos. Ir tai pagrindinis argumentas, kodėl taip dirbti variklis ilgai negali. Jei įprastai darbinių dujų temperatūrą riboja turbinos detalių medžiagų savybės, tai naudojant forsažą temperatūros dydžiui ribojimų nėra [5].

Kaip jau buvo minėta galima teigti, kad šis procesas yra išskirtinis greitų kovinių lėktuvų atributas. Galima paminėti ir du keleivinius viršgarsinius lėktuvus, kuriuose buvo realizuotas šis procesas, tai „Tu – 144“ ir „Concorde“.

Proceso esmė yra ta, kad už variklio, dirbančio Braitono ciklu, pagrindinės degimo kameros ir turbinos yra įrengiami papildomi degalų išpurškimo kolektoriai, per kuriuos yra tiekiami ir išpurškiami degalai tiesiai ištekantių dujų srautą. Šį procesą naudojančiuose varikliuose



15.pav. Turbo reaktyvinio variklio su forsažo kamera pjūvis [22]

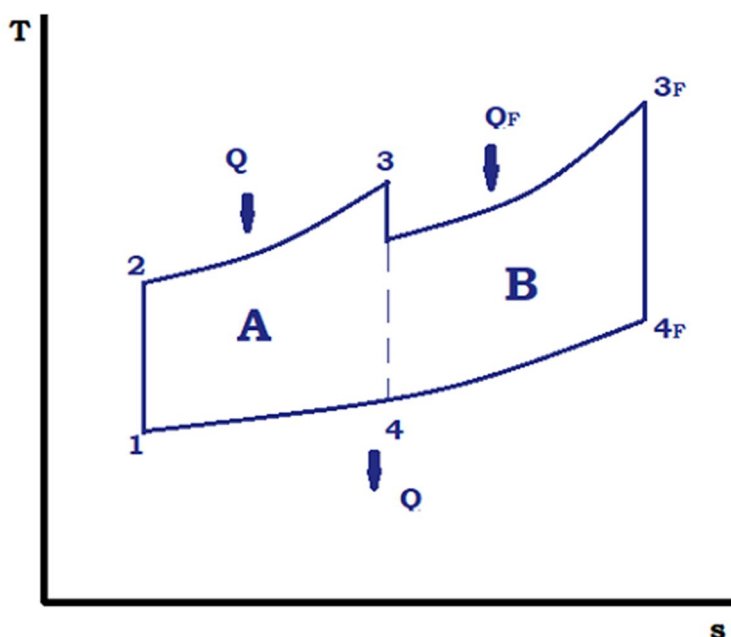
įrengiama reguliuojamo ploto išmetimo tūta. Įjungus šią kamerą, deginant papildomas degalus, intensyviai keliama darbo kūno temperatūra, tuo pat metu didėja ir iš tūtos ištekantių dujų greitis, ko pasekoje didėja variklio trauka.

Pirmose realiose konstrukcijose būdavo įrengiamas vienas forsažo kolektorius. Dabar naudojamos įvairios kelių pakopų schemas. Įrengiami keli vienas paskui kitą sekantys forsažo kolektoriai, kurie

gali būti įjungiami į darbą visi vienu metu, tokiu atveju variklio trauka didėja daugiau nei du kartus. Tačiau kolektoriai gali būti naudojami po vieną ar po kelis kartu. Taip bandoma rasti logiškai pagrystą kompromisą tarp reikiamos traukos ir degalų sanaudų. Dabar kai naudojami daugiausia dviejų kontūrų varikliai, techniškai galimos ir naudojamos schemas kai forsažo kolektoriai išdėstomi viename arba abiejuose kontūruose [23].

Vėlgi išlieka galimybė įjunginėti į darbą kolektorius atitinkamais eiliškumais. Toks papildomo proceso ištobulinimas leidžia ir kai kuriems 4-os kartos koviniams lėktuvams ilgą laiką skraidyti dideliais ($M = 1.7 \div 1.8$) greičiais. Darbo laiką šiuo režimu riboja didelės degalų sanaudos. Todėl 5-os kartos naikintuvuose įgyvendintas viršgarsinio skrydžio režimas nenaudojant forsažo kameros. Čia forsažo režimo nėra atsisakoma ir naudojamas jis, kaip ir anksčiau pasiekti maksimaliems skrydžio greičiams, bet papildomai greičiais apie $1.75M$ galima skraidyti nenaudojant forsažo režimo. Išoriškai varikliams, kuriuose naudojamas šis procesas, būdingas didelis gabaritinis ilgis. Žemiau pateikiamas tokio variklio pjūvis.

Taip modifikuoto ciklo T – s diagrama įgauna sekantį pavidalą.



16.pav. Idealaus Braitono ciklo su forsažu T-s diagrama [1]

Šioje diagramoje atkarpa 1 – 2 adiabatiniis oro suspaudimas kompresoriuje; atkarpa 2 – 3 izobariniis šilumos suteikimas; 3 – T adiabatiniis plėtimasiis turbinoje; T – 3F izobariniis šilumos suteikimas forsažo kameroje; 3F – 4F adiabatiniis plėtimasiis tūtoje; 4F – 1 izobariniis šilumos atidavimas aplinkai.

Įprastai dujų degimo temperatūra forsažo kameroje yra aukštesnė nei dujų temperatūra prieš turbina. Taip yra dėl to, kad čia nėra ribojimų susijusių su turbinos atsparumu. Jei turbina išjungta variklis dirba paprastu Braitono ciklu 1 – 2 – 3 – 4 – 1. Variklis su forsažo kamera generuoja didesnę

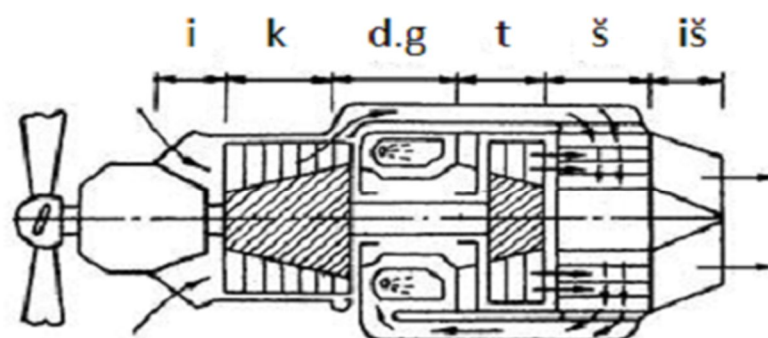
trauką dėl ciklo darbo padidėjimo, bet kartu smarkiai nusileidžia įprastam varikliui ekonomiškumu. Praktiškai variklio su forsažine kamera darbo ciklas susideda iš dviejų dalių A + B, dalis A darbas paprastuoju ciklu, dalis B forsažo kameros darbas. Suma šių dalių ir sudaro pilną darbą. Cikle B suspaudimo laipsnis akivaizdžiai mažesnis nei cikle A. Todėl ir šio ciklo terminis naudingumo koeficientas bus mažesnis nei ciklo A (pav 16). Pasekoje ir šilumos suteiktos, sudėtiniame cikle, pavertimas į darbą vyks su mažesniu naudingumo koeficientu nei pirminiame cikle A [2].

Na o šio režimo naudojimo nagrinėjamo tipo varikliuose t.y. turbosraigtiniuose bei turboveleniniuose varikliuose, kuriuose ir be to stengiamasi kiek galima priartinti išmetamų dujų slėgį prie aplinkos slėgio tam, kad maksimaliai sumažinti reaktyvinės traukos dedamąją ir gauti maksimalią galią ant variklio veleno, poreikio nėra. Tokių variklių projektavimo praktika tik patvirtina šią tendenciją.

Pagrindinė išvada būtų tokia, kad forsažo rpocešą yra tikslinga naudoti tuose varikliuose, kur trumpalaikio bet didelio traukos padidinimo realizavimas yra pagrindinis tikslas viso variklio projekte, atsveriantis net didelę neigiamą degalų sanaudų didėjimo įtaką.

2.3. Regeneracijos proceso naudojimo novacija

Regeneracija yra vienas iš būdų padidinti ciklo terminio naudingumo koeficientą. Principinė turbo sraigtinio variklio su regeneracija schema parodyta paveikslėlyje (pav 17). Pagrindinis tokio variklio skirtumas nuo bet kurio kito įprastinio turbo sraigtinio variklio yra tai, kad už turbinos, ilginamajame vamzdyje yra sumontuotas šilumokaitis, kuriame karštos dujos, išeinančios iš



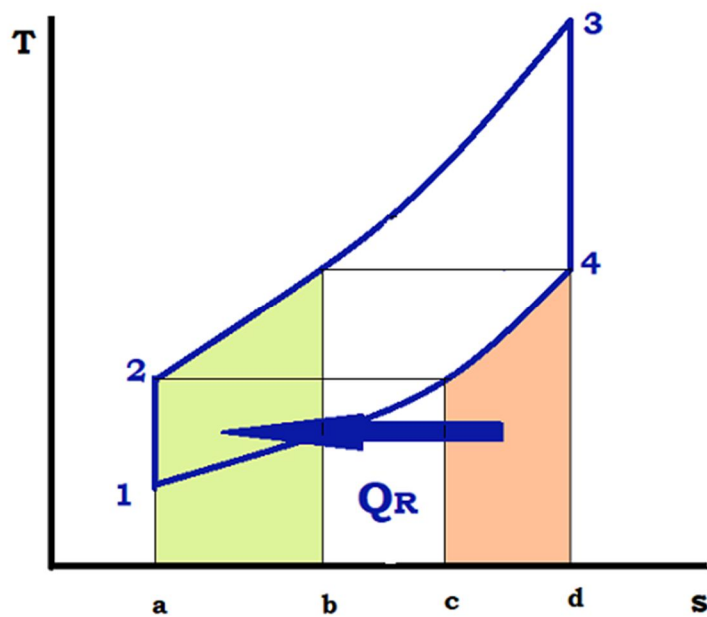
17.pav. Variklio su regeneracijos šilumokaičiu schema. Schemoje: i – įsiurbimo įrenginys; k – kompresorius; d.g – degimo kamera; t – turina; š – šilumokaitis; iš – išmetimo tūta [

turbinos, įšildo orą, paimamą kompresoriuje.

Šiuo atveju suteikiama ne visa išeinančių dujų turima šiluma, bet dalis jos. Toks oro pašildymas šilumokaityje, įgalina suteikti mažiau šilumos degimo kameroje, kad bendrai sistemai įgytu reikalingą temperatūrą T_3 . Kaip galima padaryti išvadą iš taip modifikuoto ciklo $T - s$ diagramos, regeneracija įmanoma tik tada, kai dujų temperatūra didesnė nei oro temperatūra už kompresoriaus. Teoriškai maksimali temperatūra, iki kurios galima įšildyti orą šilumokaityje yra lygi dujų temperatūrai už turbinos. Šiame ribiniame atvejuje, regeneracijoje dalyvauja maksimalus šilumos kiekis. Žemiau pateikiama darbo ciklo su regeneracija $T - s$ (temperatūros – entropijos) diagrama [1].

Entropija – termodinaminės sistemos netvarkos matas, rodantis, kaip arti pusiausvyros yra sistema. Termodinaminė sistema ar tūris, ar fizinis objektas, kurio buvį galima aprašyti termodinaminiais dydžiais: temperatūra, slėgiu, tūriu ir tankiu.

Grįžtamuosiuose procesuose uždaros sistemos entropija yra pastovi, o negrįžtamuose procesuose entropija didėja.



18.pav. Idealaus Braitono ciklo su regeneracija T-s diagrama

Toki idealų procesą sudaro šie etapai (pav 18): 1 – 2 adiabatinis suspaudimas įsiurbiklyje ir kompresoriuje; 2 – 2p izobarinis šilumos suteikimas šilumokaityje; 2p – 3 izobarinis šilumos suteikimas degimo kameroje; 3 – 4 adiabatinis plėtimasis turbinoje; 4 – 4p izobarinis šilumos paėmimas, oro šildymui, šilumokaityje; 4p – 1 izobarinis šilumos išmetimas į aplinką [1].

Regeneracija yra lydima dujų ištekėjimo greičio mažėjimu ir pilno slėgio kritimu, dujoms praeinant per šilumokaitį. Ko poveikyje mažėja turbo reaktyvinio variklio trauka. Bet kartu mažėja ir santykinės degalų sąnaudos. Svarbiausias rodiklis charakterizuojantis regeneracijos procesą yra regeneracijos laipsnis. Jis atspindi realiai perduodamos ir maksimaliai galimos perduoti šilumos kiekių santykį. Tada susidaro įspūdis, kad geriausi rezultatai gaunami, kai yra maksimalus temperatūrų skirtumas tarp temperatūros už turbinos ir temperatūros už kompresoriaus. Šis maksimalus skirtumas ir yra būdingas turbo reaktyviniams varikliams. Tačiau dėl traukos mažėjimo išgauti realaus efekto neimanoma. Matomai dėl šios ypatybės regeneracija turbo reaktyviniuose varikliuose nėra naudojama [2].

Gerokai kitaip situacija klostosi kai regeneracija naudojama turbosraigtiniame ar turboveleniniame varikliuose. Turbosraigtiniame variklyje natūraliai reaktyvinės traukos sudedamoji dalis maža o turboveleniniuose varikliuose reaktyvinės traukos sudedamosios dalies išvis stengiamasi atsisakyti, tai reaktyvinės traukos mažėjimas dėl šilumokaičio didelės įtakos neturi.

Svarbiausias parametras apsprendžiantis regeneracijos efektyvumą yra regeneracijos koeficientas. Jis skaičiuojamas naudojant formulę [1]:

$$\varepsilon = \frac{T_r - T_k}{T_t - T_k} \quad (2.3.1)$$

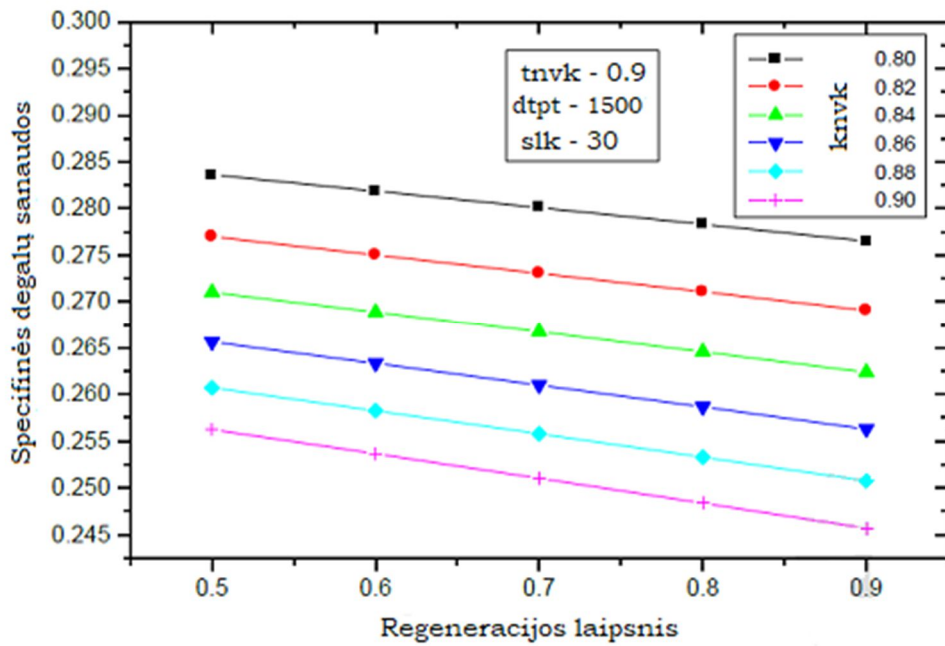
čia:

T_r – dujų temperatūra už šilumokaičio;

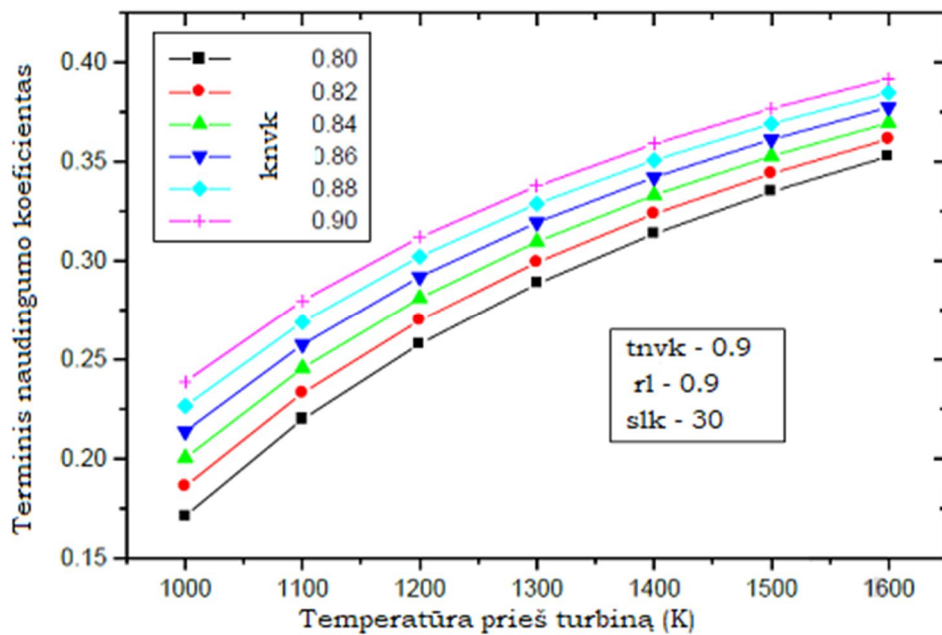
T_t – dujų temperatūra už turbinos;

T_k – dujų temperatūra už kompresoriaus.

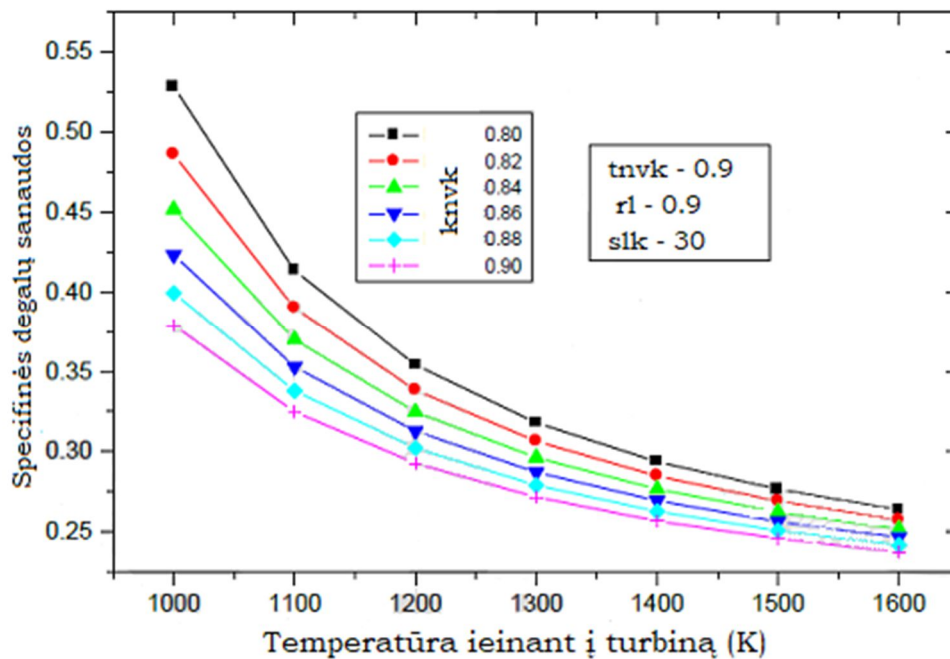
Pagrindė regeneracijos nauda priklauso nuo regeneracijos koeficiento, suspaudimo laipsnio ir temperatūrų skirtumo. Tyrimais yra nustatyta, kad dirbant vienodomis sąlygomis dviems varikliams su vienodais parametrais, kai suspaudimo laipsniai nuo 8 iki 20, ekonomiškėnis bus variklis su regeneracija, kurios laipsnis nuo 0.5 iki 0.9. Tokio variklio degalų sąnaudos gali būti mažesnės nei variklio be regeneracijos nuo 10% iki 30%. Toliau bus pateikti keli grafikai su tyrimų rezultatų kreivėmis, kurios vizualiai parodo terminio naudingumo koeficiento, degalų sąnaudų teigiamą pokytį. Darosi aišku, kad regeneracija gali duoti teigiamą efektą turbosraigtiniuose varikliuose, kur yra didelės dujų temperatūros prieš turbiną ir santykinai nedideli suspaudimo laipsniai [1].



19.pav. Specifinių degalų sanauđų kitimas priklausomai nuo regeneracijos laipsnio [1]



20.pav. Terminio naudingumo koeficiento kitimas priklausomai nuo dujų temperatūros prieš turbiną [1]

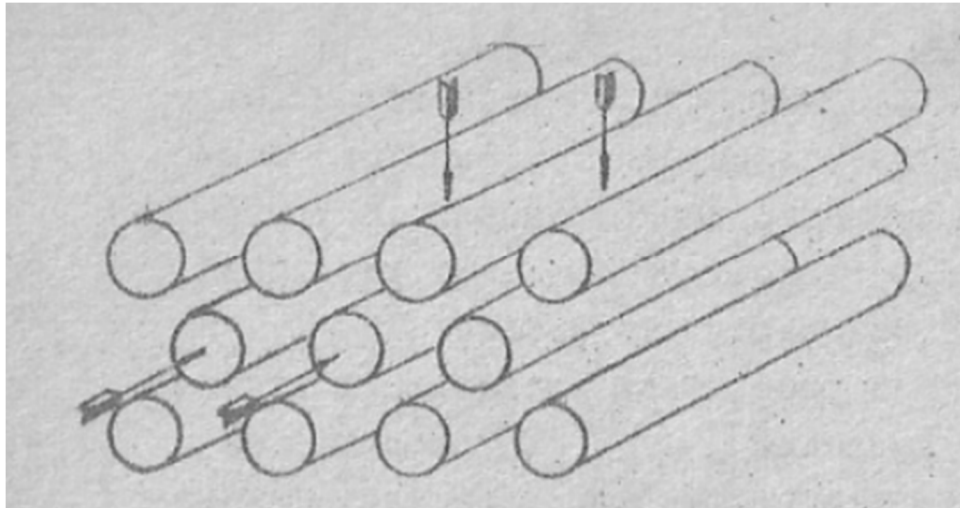


21.pav. Specifinių degalų sanaudų kitimas priklausomai nuo dujų temperatūros prieš turbiną [1]

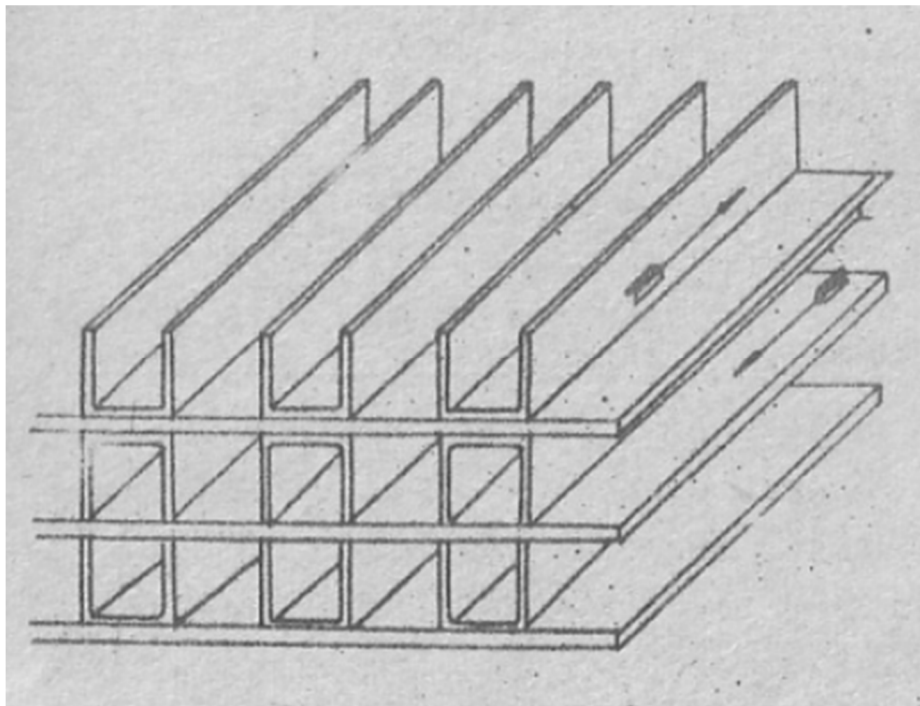
Regeneracijos procesas labai plačiai naudojamas stacionariuose pramoniniuose, bei laivų trubininiuose varikliuose. Nežiūrint tyrimais patvirtinto šio proceso naudingumo aviaciniuose turbosraigtiniuose bei turboveleniniuose varikliuose jis nėra plačiai naudojamas. Matomai konstrukcinės problemos, kurias tenka išspręsti aviaciniuose varikliuose yra pakankamai sudėtingos ir sprendimai yra susiję su dideliais neigiamais padariniais. Didžiausias neigiamas poveikis bus juntamas tokių variklių gabaritams bei masei.

Patys šilumokaičiai yra pakankamai sudėtingi, ir tuo atveju jei yra naudojami aviaciniame variklyje, turi tenkinti visą eilę specifinių reikalavimų. Turi būti kompaktiški ir tvirti, kad galėtų būti naudojami aukštų temperatūrų bei slėgių aplinkoje. Medžiagos iš kurių, jie pagaminti turi turėti didelius šilumos perdavimo koeficientus. Sudaryti mažus pasipriešinimo koeficientus, kad netrikdyti dujų ištekėjimo proceso [23].

Pagal konstrukciją šilumokaičiai būna vamzdiniai (pav. 22), plokštiniai (pav. 23) ir besisukantys. Antžeminių dujų turbinų įrenginių konstrukcijose daugiausiai naudojami vamzdiniai šilumokaičiai. Gal todėl ir procesai juose yra geriausiai ištyrinėti. Pagrindiniai tokių šilumokaičių privalumai – konstrukcijos tvirtumas bei gamybos ir remonto paprastumas.



22.pav. Vamzdinio šilumokaičio schema [23]



23.pav. Plokštinio šilumokaičio schema [23]

Jei kaip skaičiavimo pavyzdžiu pasinaudoti paveikslėlyje (pav. 23) pateikta schema, galima pakankamai nesudėtingai pasiskaičiuoti regeneracijos temperatūras. Visų skaičiavimų atlikimui reikia užsiduoti regeneracijos laipsnį ε , kuris aviacinėms konstrukcijoms imamas nuo 0.65 iki 0.75.

Tokiu atveju skaičiuosime naudodamiesi šiomis formulėmis:

$$T_r = \varepsilon(T_5 - T_2) + T_2; \quad (2.3.2)$$

$$T_6 = T_5 - \varepsilon(T_5 - T_2). \quad (2.3.3)$$

Tiriamąjį darbo metu, surinkta medžiaga rodo, kad regeneracija yra efektyvus procesas. Tai patvirtina ir platus šio proceso naudojimas antžeminėse dujų turbininėse jėgainėse. Na o šio proceso naudojimą aviaciniuose varikliuose matomai stabdo konstrukciniai ir technologiniai šilumokaičių komponavimo sunkumai. Beje efektyviausiais aviacinių variklių srytyje, literatūroje įvardijami besisukančio tipo šilumokaičiai.

Regeneracijos naudojimo variklyje tikslingumas yra apsprendžiamas variklio konstrukcijos, jo naudojimo sąlygų, variklio gabaritų, masės ir visos eilės kitų reikalavimų bei sąlygų.

Kadangi projektuojamame variklyje vieni iš svarbiausių parametru yra nedidelė masė, apie 100 kg ir nedideli gabaritai. Tai vertindami regeneracijos panaudojimo galimybę ir išeisime iš šių reikalavimų [5].

Tyrimais ir skaičiavimais yra nustatyta, kad pačio paprasčiausio vamzdinio šilumokaičio panaudojimas, užsiduodant regeneracijos laipsnį nuo 0.7 iki 0.8, variklio masę padidina nuo 40 iki 80 % lyginant su variklio be regeneracijos mase. Nereikia pamiršti ir to, kad šilumokaičio panaudojimas iššauks ir variklio skersmens gabarito padidėjimą. Tai savo ruožtu sumažins efektyviają trauką dar nuo 2 iki 5 % [23].

Aviaciniuose informaciniuose portaluose yra minima, kad egzistuoja variklio MGTD – 250 eskizinis projektas, kuriame numatoma naudoti regeneracijos procesą. Tai apie 350 e.a.g. variklis. Projekto autorius CIAM (Rusija).

3. TSV SKAIČIAVIMO METODIKOS APŽVALGA

3.1. Turbo reaktyvinio variklio parametrų skaičiavimo seka

Kaip žinome aviacijoje yra naudojama keletas tipų dujų turbininių variklių. Tačiau kai kurie jų skaičiavimo etapai yra pakankamai panašūs ir turi bendrų metodikų.

Tokių variklių projektavimo pagrindas – tarp pusavyje susiję termodinaminis ir dujų dinaminis skaičiavimai. Jų tikslas – nustatyti darbo kūno, (kompresoriuje oras, o turbinoje degimo produktas dujos) parametrus, būdinguose variklio pratekamosios dalies pjūviuose, bei oro sanaudas variklyje, santykinę trauką arba galią, priklausomai nuo variklio tipo nustatomas vienas iš šių parametrų, santykinės degalų sanaudas. Taip pat šių skaičiavimų metu nustatomi ir geometriniai variklio pratekamosios dalies parametrai [23].

Būtinai duomenys visų tipų variklių skaičiavimams atlikti yra; skaičiavimo salygos t.y. skrydžio aukštis H ir greitis V , taip pat skaičiuojamo variklio tipo darbo proceso parametrai.

Išeitiniais duomenimis atliekant turboreaktyvinio variklio skaičiavimą bus trauka, suspaudimo laipsnis kompresoriuje, dujų temperatūra prieš turbiną.

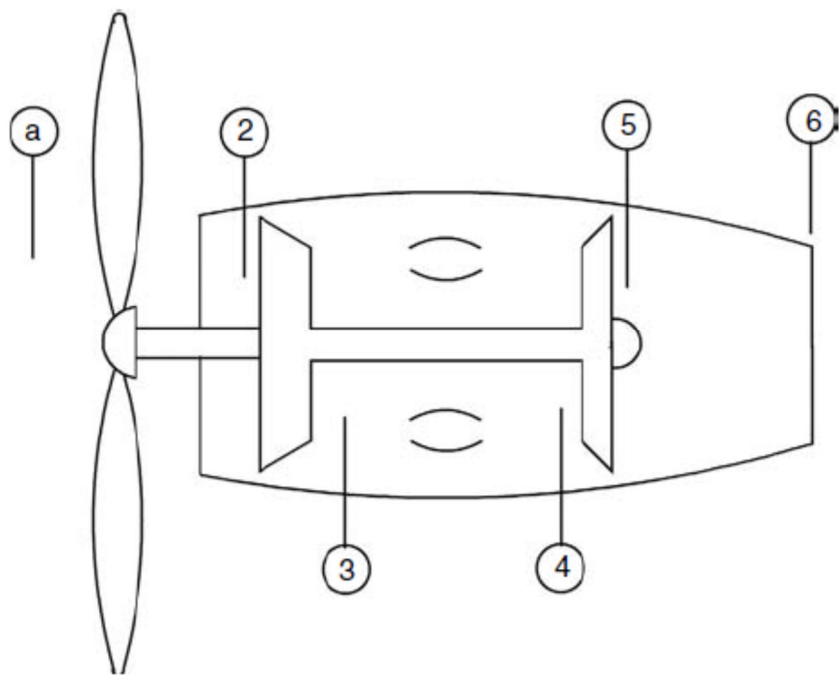
Turbo sraigtinio variklio skaičiavimams išeitiniais duomenimis bus veleno galia, kompresoriaus suspaudimo laipsnis, dujų temperatūra prieš turbiną.

Taigi tokių skaičiavimų pagrindą sudaro vieno kontūro vieno veleno turbo reaktyvinio variklio termodinaminis skaičiavimas. Pradedami skaičiavimai nusistatant būdinguosius pratekamosios dalies skespiūvius. Toks turbo reaktyvinio variklio sudalinimas skaičiavimui atlikti pateikiamas žemiau [22].

Skaičiavimai atliekami minimaliai pirmu priartėjimu bent trims variklio darbo režimams. Tai maksimalios traukos režimas kada $H = 0$ ir $V = 0$, t.y. variklis stovi vietoje. Sekantis režimas maksimalaus skrydžio aukštyje maksimaliu greičiu, $H = H_{max}$ ir $V = V_{max}$. Na ir trečiasis skaičiuojamas režimas yra kreiserinio skrydžio režimas, $H = H_{kreis}$ ir $V = V_{kreis}$. Toliau esant reikalui tarpinių kreiserinių režimų yra perskaičiuojama keletas, jau derinant variklį prie konkretaus orlaivio.

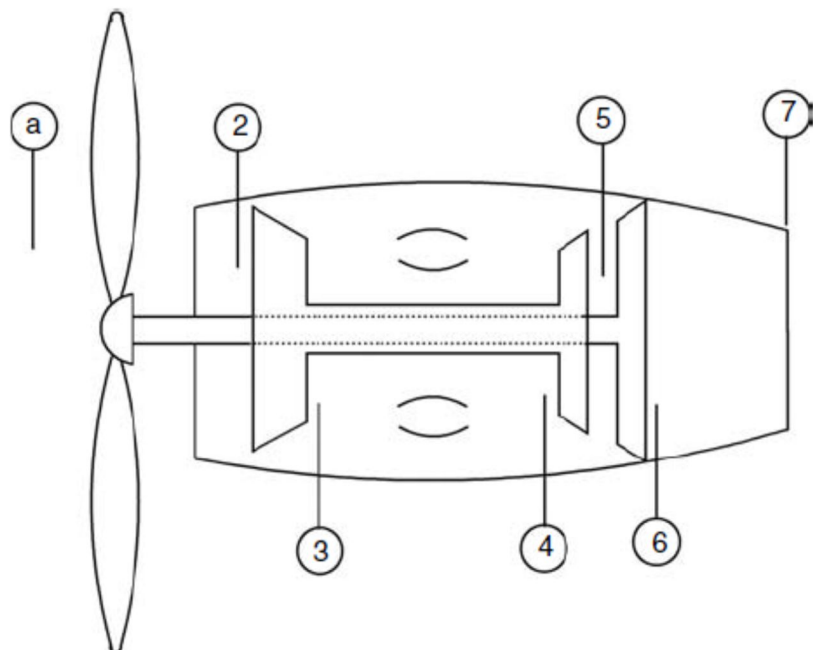
Susipažinus su turbo sraigčių variklių konstrukcinėmis schemomis, tampa aišku, kad turbo sraigtinio variklio termodinaminio skaičiavimo pagrindą sudaro vieno veleno vieno kontūro turbo reaktyvinio variklio skaičiavimo metodika.

Kada skaičiuojamas vieno veleno turbo sraigtinis variklis jo skaičiavimo schema t. y. suskirstimas į būdingus pjūvius atrodo sekančiai:



24.pav. Vieno veleno TSV skaičiavimo schema [22]

Kada skaičiuojamas turbo sraigtinis variklis su laisvąja jėgos turbina skaičiavimo schema bus tokia:



25.pav. TSV su laisvąja jėgos turbina skaičiavimo schema [22]

Tai dvi plačiausiai naudojamos turbo sraiginių variklių konstrukcinės schemos. Antruoju variantu labai gerai matoma, kad turbo generatorius yra būtent vieno kontūro turbo reaktyvinis variklis. Dabartinėje aviacinių dujų turbininių variklių praktikoje plačiai naudojama projektavimo metodika kai sėkmingai suprojektuotas turbo generatorius tampa pagrindų įvairių tipų ir galios diapazonų variklių šeimos pagrindu.

3.2. Turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodikos apžvalga

Tipinė turbo sraigtinio variklio skaičiavimo metodika atrodo sekančiai.

Žingsnis.1 Nusistatomas variklio tipas ir elementai; kompresorius, degimo kamera, turbina, išmetimo tūta, reduktorius.

Žingsnis.2 Užsiduodama variklio ekvivalentinė galia N_e .

Žingsnis.3 Užsiduodamas skrydžio greitis V .

Žingsnis.4 Skrydžio aukštis H (slėgis p_a ir temperatūra T_a , susirandami iš standartinės atmosferos lentelių).

Žingsnis.5 Suspaudimo laipsnis kompresoriuje π_K .

Žingsnis.6 Dujų temperatūra prieš turbiną T_3 .

Žingsnis.7 Degalai (mažiausias koringumas H_U).

Žingsnis.8 Nustatomi oro įeinančio į kompresorių parametrai:

a) tempera

$$T_{ij} = T_a \left(1 + \frac{k_{or}-1}{2} M_S^2 \right), \quad (3.2.1)$$

b) slėgis

$$p_{ij} = \sigma_{ij} \cdot p_a \cdot \left(1 + \frac{k_{or}-1}{k_{or}} M_S^2 \right)^{\frac{k_{or}}{k_{or}-1}}, \quad (3.2.2)$$

čia: σ_{ij} – slėgio atsistatymo įsiurbiklyje koeficientas, kurio dydis priklauso nuo įsiurbimo aparato tipo.

Žingsnis.9 Oro išeinančio iš kompresoriaus parametrai

a) temperatūra

$$T_K = T_{ij} + T_{ij} (\pi_K^{0.286} - 1) \frac{1}{\eta_K}, \quad (3.2.3)$$

čia: η_K – kompresoriaus naudingumo koeficientas, kurį galima įsivertinti kaip $\eta_K = \eta_{ad} \cdot \eta_m$, kur atitinkamai adiabatinis ir mechaninis naudingumo koeficientai, kurių dydžiai priklauso nuokompresoriaus tipo.

b) slėgis

$$p_K = p_a \cdot \pi_K. \quad (3.2.4)$$

c) kompresoriaus darbas

$$W_K = \frac{k_{or}}{k_{or}-1} R_{or} T_{ij} (\pi_K^{0.286} - 1) \frac{1}{\eta_K}. \quad (3.2.5)$$

Žingsnis.9 Degimo kamera

a) vidutinis šiluminis talpumas degimo kameroje

$$c_{pcp} = 878 + 0.208(T_D + 0.48T_K), \quad (3.2.6)$$

Sudegimo pilnumo koeficientas įprastai imamas $\eta_{deg} = 0.99$; mažiausias degalų koloringumas aviaciniam žibalui $H_U = 42500 \div 43500$ kJ/kg.

Tada santykinės degalų sanaudos

$$q_{deg} = \frac{c_{pcp}(T_D - T_K)}{\eta_{deg} H_U}. \quad (3.2.7)$$

b) slėgis už degimo kameros

$$p_{DK} = p_K \cdot \sigma_{DK}, \quad (3.2.8)$$

čia: σ_{DK} – slėgio atsistatymo degimo kameroje koeficientas, kuris priklauso nuo degimo kameros tipo.

c) temperatūra už degimo kameros prieš turbiną yra užduota tai žinomas dydis T_D .

Žingsnis.10 Dujų parametrai už turbinos

a) temperatūra

$$T_T = \frac{T_D}{1 - \frac{k_d - 1}{2} M_d^2} \quad (3.2.9)$$

čia: M_d – dujų srauto greitis išreikštas Macho skaičiumi, jei greitis žinomas m/s, tai jį galima perskaičiuoti naudojant formulę:

$$C_T = \frac{M_d}{\sqrt{k_d g R_d T_T}}, \quad (3.2.10)$$

tikslinga atkreipti dėmesį, kad pradėjus skaičiuoti parametrus už tudegimo kameros pasikeičia dujų pastoviosios R ir adiabatės rodiklio k dydžiai, karštomis dujoms jie turi kitas skaitines reikšmes nei šaltam orui spadžiamam kompresoriuje.

b) darbas turbinoje

$$W_T = \frac{W_K}{(1 + q_{deg})(1 - \delta_{aus})\eta_T}, \quad (3.2.11)$$

čia: δ_{aus} – oro sanaudos karštomis turbinos detalėms aušinti, jei oras bus naudojamas ir lėktuvo sistemų darbingumui užtikrinti (pvz. priešledinė sistema, salonų šildymas, hermetizacijos ir ventiliacijos sistemos) tai viso papildomo oro poreikis turi būti įtrauktas į variklio skaičiavimus; η_T

– bendras turbinos naudingumo koeficientas, kuris įvertinamas analogiškai kaip ir kompresoriaus bendras naudingumo koeficientas $\eta_T = \eta_{T\text{adi}}\eta_{Tm}$.

c) temperatūra

$$T_T = T_D - \frac{W_T}{\frac{k_d}{k_d-1}R_d}, \quad (3.2.12)$$

d) slėgis

$$p_T = \frac{p_D}{\pi_T}, \quad (3.2.13)$$

čia: π_T – slėgio mažėjimo laipsnis turbinoje.

Prieita prie vienos sudėtingiausių skaičiavimo vietų, Kada nėra tikslios ir aiškios skaičiavimų metodikos ir skirtingi šaltiniai pateikia skirtingas ir nevisiškai aiškias.

Yra siūloma suspaudimo mažėjimo laipsnį apskaičiuoti pagal formulę:

$$\pi_T = \frac{1}{\left(1 - \frac{W_K + W_P}{\frac{k_d}{k_d-1}R_d T_D \eta_T \eta_{red}}\right)^{4.03}}. \quad (3.2.14)$$

Turbinos galios turi apakakti sukti kompresoriui ir oro sraigtiui, plius tam tikras perteklius patenkinti mechaninius nuostolius kompresoriuje bei propelerio reduktoriuje.

Sutinkamos metodikos siūlančios pirmam priartėjimui panaudoti statistinės analizės metodikas ir pasirinkti slėgio mažėjimo turbinoje koeficientą, įvertinant jau egzistuojančių atitinkamos konstrukcinės schemos variklių su tokio paties tipo turbinomis rodiklius.

Kadangi dažnai siekiama, kad išmetimo tūtoje turbo sraigtinių bei turbo veleninių variklių išmetimo tūtuose vyktu pilnas plėtimasis, t. y. plėtimasis iki aplinkos slėgio galima turbiną ir išmetimo tūtą analizuoti kaip vieną bendrą mazgą [9].

Tada reikalinga papildomai įsivertinti kai kuriuos tūtos parametrus; kaip kritinį slėgių skirtumą bei dujų ištekiančių iš tūtos srauto greitis.

Kritinis slėgių skirtumas:

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{k_d-1}\right)^{\frac{k_d}{k_d-1}}. \quad (3.2.15)$$

Kai išsiplėtimas pilnas $p_{tut} = p_a$, kada išsiplėtimas nepilnas $p_{kr} = p_T \cdot \beta_{kr}$.

a) dujų ištekėjimo iš turbinos greitis skaičiuojamas:

$$C_{5kr} = \varphi_{rt} \sqrt{2 \frac{k_d}{k_d-1} R_d T_4 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_4}\right)^{\frac{k_d-1}{k_d}}\right]}, \quad (3.2.16)$$

čia: φ_{rt} – dujų ištekėjimo iš tūtos greičio koeficientas, priklauso nuo tūtos tipo ir yra pasirenkamas.

Taip skaičiuojamas dujų ištekėjimo iš tūtos greitis kada plėtimasis tūtoje yra pilnas.

b) dujų įtekenčių iš tūtos temperatūra

$$T_{5\ kr} = T_4 \left\{ 1 - \varphi_{kr}^2 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_4} \right)^{\frac{k_d-1}{k_d}} \right] \right\}, \quad (3.2.17)$$

taip vykdomas skaičiavimas kada plėtimasis tūtoje pilnas.

Žingsnis.11 Variklio charakteristikų skaičiavimai:

a) santykinė galia ant sraigto skaičiuojama

$$N_{sant} = \frac{W_T \eta_{red} (1 + q_{deg}) (1 - \delta_{aus})}{1000} + N_K. \quad (3.2.18)$$

b) tūtos santykinė galia, kai variklis stovi vietoje

$$N_{tut\ sant} = 0.068 (1 + q_{deg}) (1 - \delta_{aus}) C_{5\ kr}. \quad (3.2.19)$$

c) santykinė ekvivalentinė variklio galia

$$N_{e\ sant} = N_{sant} + N_{tut\ sant}. \quad (3.2.20)$$

d) ekvivalentinė galia

$$N_e = Q_{oro} \cdot N_{e\ sant}. \quad (3.2.21)$$

e) santykinės degalų sanaudos

$$C_e = \frac{3600 \cdot q_{deg}}{N_{sant}}. \quad (3.2.22)$$

Skaičiavimo metodikos skirtos skaičiuoti turbo sraiginių variklių, kurių konstrukcijoje naudojama laisvoji jėgos turbina, skaičiavimo metodikos visumoje yra įdentiškos variklio be laisvos turbinos skaičiavimui.

Pagrindinis skirtumas tas, kad su sraigtu dirba būtent laisvoji jėgos turbina. Tokia turbo sraiginių variklių konstrukcinė schema, šiandien yra vyraujanti.

3.3 Užsiduodamų parametrų pasirinkimo sekos

Skaičiavimams atlikti reikalinga pakankamai daug išeitinių duomenų, kuriuos galima skaičiuoti, bet geriau pasirinkti iš lentalių arba grafikų. Labiausiai tai liečia dujų dinamines funkcijas. Kaip pavyzdžiui: $\pi(\lambda_c)$ arba $q(\lambda_c)$. Šias funkcijas patogiausia yra susirasti lentelės, kurios yra sudarytos skirtingiems adiabatės rodikliams, ir kai $k = 1.4$ ir kai $k = 1.33$. Šios lentelės yra pakankamai lengvai pasiekiamos ir literatūroje ir internetiniuose šaltiniuose.

Daugelis metodikų pateikia ir susistemintus analitinius duomenys apie esamus kai kurių parametrų dydžius. Tai yra naudinga ir pagreitina darbą pačioje pirmoje stadijoje, leidžia geriau susiorientuoti ko galima tikėtis priėmus vieną ar kitą sprendimą. Labai naudinga kada skelbiama informacija apie atskirų variklio elementų terminius ir mechaninius naudingumo koeficientus.

Jei kaip pavyzdį panagrinėtume išėitinę situaciją, kai reikia pasirinkti kokį naudosime kompresoriaus tipą ašinį ar išcentrinį? Lengviau pasirinkti kai yra žinoma, kad išcentrinio kompresoriaus terminis naudingumo koeficientas $\eta_{term} = 0.75 \div 0.82$, o ašinio kompresoriaus tas pats koeficientas yra ribose $0.82 \div 0.86$. Kai yra patikimi duomenys, kad suspaudimo laipsnis vienoje ašinio kompresoriaus pakopoje įprastai būna iki 2, o tas pats rodiklis išcentrinio kompresoriaus vienoje pakopoje $8 \div 10$ ir daugiau. Na abiejų tipų kompresorių mechaniniai naudingumo koeficientai $0.98 \div 0.99$.

Skaičiuojant pirminiu priartėjimu, iš analogiškų sąvadų galima pasirinkti įsivertinimui darbo kūno srauto greičius; pvz. srauto greitis įeinant į išcentrinį kompresorių būna ribose $180 \div 200$ m/s, išeidamas iš išcentrinio kompresoriaus rato srauto greitis – $100 \div 150$ m/s.

Srauto greitis jam patenkant į turbiną – $120 \div 180$ m/s.

Visi paminėti parametrai išrinkti tie, kurie taikomi turbo sraigtinių variklių skaičiavimuose.

Daug informacijos iš kur galima susirinkti išėitinius duomenis skaičiavimams, įpatingai susijusius su degalais bei jų specifiniais ir svitaisiais parametrais galima rasti pateikiamus grifikų pavidalu.

3.4. TSV vadymo ir reguliavimo dėsnių analizė

Kad būtų galima atlikti skaičiavimus reikalinga užsiduoti turbo sraigtinio variklio valdymo dėsnius. Tai skaičiavimui aukščio ir greičio scharakteristikų įvertinimui.

Turbo sraigtiniai varikliai su laisvąja jėgos turbina turi du reguliavimo faktorius; tai degalų sanaudos Q_{deg} ir oro sraigto nustatymo kampas φ_{sr} . Tačiau praktiškai φ_{sr} neturi įtakos dujų generatoriaus darbui. Taigi dujų generatoriaus darbo režimą apsprendžia vienas parametras ir palaiko vienas faktorius. Tai visiška analogija su vieno veleno turboreaktyviniu varikliu.

Tam, kad užtikrinti maksimalią turbo sraigtinio variklio su laisvąja jėgos turbina galią, pirmiausia turi būti užtikrintas maksimalus turbo generatoriaus darbo režimas. Šiam tikslui siekti gali būti naudojami dviejų parametru valdymo dėsniai:

$$1. \bar{n}_K = const, \bar{n}_{LT} = const \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.1)$$

$$2. \bar{n}_{TK} = cost, \bar{n}_{LT} = const \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.2)$$

$$3. T_D^* = const, \bar{n}_{LT} = const \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.3)$$

$$4. \bar{n}_K = const, \bar{n}_{LT} = var \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.4)$$

$$5. \bar{n}_{TK} = const, \bar{n}_{LT} = var \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.5)$$

$$6. T_D^* = const, \bar{n}_{LT} = var \quad (Q_{deg} = var, \varphi_{sr} = var). \quad (3.4.6)$$

Reguliavimo dėsmžniai nuo 4 iki 6 yra mažiau nustatyti nei reguliavimo dėsniai nuo 1 iki 3. Priklausomybės $\bar{n}_{LT} = f(M_s, H)$ pasirinkimo kriterijumi gali būti maksimalios galios ant sraigto veleno gavimas. Turbo sraigtinio variklio dujų generatoriaus, su laisvja jėgos turbina, reguliavimo dėsniai visumoje yra indentiški tokiems dėsniams dujų trubininiame variklyje su vienu reguliavimo parametru.

Bet kuris turbo sraigtinis variklis dirba apribojimais nustatytoje erdvėje, taigi esant bet kuriam reguliavimo dėsniai, turi būti įvykdyti sekantys apribojimai:

$$\bar{n}_K \leq \bar{n}_{K \max}, \quad \bar{n}_{TK} \leq \bar{n}_{TK \max}, \quad \bar{n}_{LT} \leq \bar{n}_{LT \max}, \quad T_D \leq T_{D \max}, \quad \Delta K_y \geq \Delta K_{y \min}, \quad N_{vel} \leq N_{vel \max}.$$

Reikia pažymėti, kad įvykdyti visus keliamus reikalavimus visuose skrydžio M ir H diapazonuose ir kartu neperžengti apribojimų reikalavimų, naudojami kombinuoti reguliavimo dėsniai, t.y. skirtinguose darbo ir skrydžio režimuose naudojami skirtingi dėsniai.

Panalizuokime bendrą kompresoriaus, degimo kameros ir turbinos darbą turbo sraigtinio variklio dujų generatoriujė, esant bet kuriam iš valdymo dėsnių.

Bendru atveju nepriklausomu kintamuoju priimami santykiniai lyginamieji kompresoriaus apsisukimai:

$$\bar{n}_{TK} = \bar{n}_K \bar{T}_a^{*-0.5}, \quad (3.4.7)$$

čia: $\bar{n}_K = \frac{n_K}{n_{K0}}$, ir $\bar{T}_a^* = \frac{T_a^*}{T_0}$.

Bendro kompresoriaus ir turbinos darbo lygtį dujų generatoriujė galima užrašyti, kaip:

$$\frac{\left[q(\lambda_{or})^2 (\pi_K^{\frac{k_{or}-1}{k_{or}}} - 1) \right]}{\pi_{K0}^{*2} \eta_{K0}} = A_2. \quad (3.4.8)$$

Skaičiavimų rezultatai duoda π_K^* , $q(\lambda_{or})$, $\eta_K = f(\bar{n}_{TK})$. (3.4.9)

Dujų temperatūros priklausomybė įgija išraišką:

$$T_D^* = f(\bar{n}_{TK}). \quad (3.4.10)$$

Galiausiai nustatomas kompresoriaus darbo darbo stabilumo atsargos rodiklis:

$$\Delta K_y = \left(\frac{\left[\frac{\pi_K^*}{q(\lambda_{or})} \right]_{rib}}{\left[\frac{\pi_K^*}{q(\lambda_{or})} \right]_{darb}} - 1 \right) 100. \quad (3.4.11)$$

Čia indeksai „rib“ ir „darb“ atitinka parametrų reikšmes, kurios rboja stabilų kompresoriaus darbą, darbo režimų sekoje.

Pasekoje kompresoriaus stabilaus darbo atsargos rodiklis yra funkcija:

$$\Delta K_y = f(\bar{n}_{TK}). \quad (3.4.12)$$

3.5. TSV mazgų bendro darbo skaičiavimų ypatumų analizė

Turbo sraigtinio variklio termodinaminis skaičiavimas turi tam tikrų įpatumų. Problemos kyla jei norima skaičiavimuose nesinaudoti variklio reguliavimo dėsniais. Skaičiavimų pagrindę sudaro atskirų variklio mazgų bendras darbas. Tai apibrėžia fizikines priklausomybes tarp variklio mazgų, aprašoma tai sudarant lygčių sistemas. Tačiau kiek lygčių berašytume sistemoje vienu nežinomuoju vis tiek visada bus per daug. Vadinasi sistema be papildomų sąlygų neturi sprendimo. Tomis papildomomis sąlygomis ir yra variklio valdymo dėsniai. Naudojimosi valdymo dėsniais skaičiavimuose galima atsisakyti, įvedant papildomą lygtį, kuri suriša naudingą santykinį variklio darbą ir aplamai variklio atliktą darbą [9].

Ryšys tar sunaudoto darbo ir santykinio naudingo variklio darbo gali būti užrašytas

$$W_{sant\ sun} = W_{piln} + W_R, \quad (3.5.1)$$

čia: $W_{sant\ sun}$ – santykinis darbas sunaudotas darbo atlikimui užtikrinti; W_{piln} – naudingas darbas, kurį atlieka TSV; W_R – santykinis darbas, kuris įvertina nuostolius hidraulinio pasipriešinimo variklio pratekomojoje dalyje bei darbo kūno pašildymui.

TSV atveju sunaudotiems darbams galima prikirti santykinius darbus srauto W_V , starterio W_{st} , ir degalų (Q_{deg} arba H_U).

Naudingam darbui galima priskirti darbus ant sraigto veleno W_e , santykinį kompresoriaus darbą W_k , ir santykinę trauką W_{rt} .

Tada galima užrašyti, kad:

$$W_{t\ mech} + W_V + W_{st} + zq_{deg}H_U = W_e + W_k + W_{rs} + W_{RS} + c_p(T_C - T_H). \quad (3.5.2)$$

Viena ryškesnių TSV įpatybių yra ta, kad turbina papildomai suka dar ir oro sraigtą. Iš čia ir iš plaukia išvada, kad turbinos darbo nutatyti iš kompresoriaus ir turbinos galių balanso lygties neimanoma [9].

Todėl pastarajai skaičiuoti naudojama formulė:

$$W_t = c_{pd}T_d \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k_d-1}{k_d}}}\right) \eta_t. \quad (3.5.3)$$

čia: T_d – temperatūra už degimo kameros, π_t – slėgio kritimo turbinoje koeficientas.

Jį galima išsiskaičiuoti iš slėgių balanso salygos:

$$\pi_{rt} = \frac{\pi_{sr} \cdot \pi_k \cdot \pi_V \cdot \sigma_{ièj} \cdot \sigma_{dk}}{\pi_t}. \quad (3.5.4)$$

tada iš čia:

$$\pi_t = \frac{\pi_{sr} \cdot \pi_k \cdot \pi_V \cdot \sigma_{ièj} \cdot \sigma_{dk}}{\pi_{rt}}. \quad (3.5.5)$$

Svarbu pažymėti kad dydis π_{rt} – parenkamas remiantis tuo, kad išlaikyti optimalų balansą tarp turbinos t.y. sraigto galios ir reaktyvinės tūtos, ir turėtų būti iš anksto žinomas.

Galima į turbo sraigtinį variklį pažiūrėti kaip į turbo reaktyvinio dvikontūrio atskirą atvejį, tai yra dvikontūrį vrikli su labai dideliu dvikontūriškumo laipsniu, kur oro sraigtas atlieka išorinio ventiliatorinio kontūro vaidmenį. Oro kiekį praeinanti per vidinį kontūrą pažymime $Q_{oro\ vid}$, o išorinio kontūro orą pažymime kaip $Q_{oro\ išor}$.

Tokiu atveju turbo kompresoriaus galios balanso lygtis užrašoma kaip:

$$W_{Vsr}(Q_{oro\ vid} + Q_{oro\ išor}) + W_{Vk}Q_{oro\ vid} + W_tQ_{oro\ vid} + W_tQ_{oro\ vid}\eta_{mech} = W_e(Q_{oro\ vid} + Q_{oro\ išor})\eta_{red} + W_kQ_{oro\ vid}. \quad (3.5.6)$$

čia: W_{Vsr} – aptekančio srauto energija naudojama sraigto, W_{Vk} – santykinė srauto energija naudojama kompresoriaus sukimui, W_{Vt} – santykinė srauto energija turbina sukti, W_e – santykinis darbas naudojamas sraigto pavarai, W_k – santykinis darbas naudojamas kompresoriaus pavarai.

Ši lygtis parašyta 1 kg oro atrodys taip:

$$W_e = \frac{(1+m)W_{Vsr} + W_{Vk} + W_{Vt} + W_t\eta_{mech} - W_k}{(m-1)\eta_{red}}. \quad (3.5.7)$$

Aptekančio srauto energija:

$$W_V = c_p T_a (\pi_V^{\frac{k-1}{k}} - 1). \quad (3.5.8)$$

Santykinis darbas sunaudojamas kompresoriuje:

$$W_K = c_p T_{i\dot{e}j} (\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1) \frac{1}{\eta_K}. \quad (3.5.9)$$

Santykinis dujų darbas reaktyvinės traukos sukūrimui:

$$W_{tut} = c_p T_D \left(1 - \frac{1}{\pi_{tut}^{\frac{k_d-1}{k_d}}}\right). \quad (3.5.10)$$

Santykinis darbas sunaudojamas hidrauliniam pasiprešimui, variklio pratekamojoje dalyje, nugalėti:

$$W_{hp} = W_{tut} (1 - \sigma_\Sigma). \quad (3.5.11)$$

Santykiniai šilumos nuostoliai dėl išmetamų dujų ir aplinkos oro temperatūrų skirtumo:

$$c_p (T_{tut} - T_a). \quad (3.5.12)$$

Tokiu būdu lygtis (3.5.6) užbaigia lygčių grandinę aprašančia TSV mazgų bendrą darbą, ir sudaro vienareikšmes parametrų priklausomybes nuo variklio darbo režimo. Įgalina skaičiuoti variklio charakteristikas nenaudojant reguliavimo dėsnų. Atvirkščiai jau šių skaičiavimų pasekoje galima rinktis optimalius valdymo ir ribojimo faktorius, kas įgalina didinti skaičiuojamų variklių efektyvumą.

4. NEDIDELĖS GALIOS TSV KONSTRUKCINĖS SCHEMOS PASIŪLIMAS

4.1. Skaičiavimo sąlygų pasirinkimas analizuojant variklio naudojimo sritis

Nedidelės galios turbo sraigtinį variklį galima naudoti bendrosios paskirties aviacijoje, sunkesniuose bepiločiuose orlaiviuose. Daugumos tokių skraidymo aparatų skrydžio aukštis neviršija 6000 metrų. Tačiau skrydžiai didesniame aukštyje leidžia taupyti degalus. Tada naujai projektuojamuose orlaiviuose reikėtų numatyti hermetines kabinas. Turbininiai varikliai yra pajėgūs aprūpinti hermetizavimo ir ventiliacijos sistemas reikalingomis oro sanaudomis. Todėl visumoje kaip maksimalų skridimo aukštį iki 9000 m, o skridimo greitį apie $0.5M$. Bet remiantis tuo, kad didelę tokių variklių poreikio dalį sudaro remotorizacijos galimybė, tai savaime suprantama, kad perdarinėti naujų orlaivių konstrukcijas norint padidinti skrydžio aukščius netikslinga. Daugumos tokių orlaivių kabinos nehermetinės o skridimo aukštis ne viršija 4000 metrų. Dėl šių priežasčių manau kad skaičiavimams imti skrydžio aukštį 9000 metrų yra perteklinis rodiklis, nors čekiškas variklis TP100 yra skaičiuotas ir gali veikti 9000 metrų aukštyje.

Savo projekto variklio pasiūlymo lyginamiesiems skaičiavimams pasirinksiu maksimalų skridimo aukštį 6000 m. Maksimalus skridimo greitis $0.5M$. Tokiu atveju pirmam priartėjimui renkamės tris skaičiuojamus variklio darbo režimus:

1. Skridimo aukštis $H_S = 0$ m, greitis $M_S = 0$; t. y. maksimalios galios režimas.
2. Skridimo aukštis $H_S = 3000$ m, skridimo greitis $M_S = 0.3M$; kreiserinis režimas.
3. Skridimo aukštis $H_S = 6000$ m, skridimo greitis $M_S = 0.5M$; maksimalūs greitis ir aukštis.

Daugiau kreiserinio režimo variantų yra tikslinga skaičiuoti derinant variklį prie konkretaus orlaivio tipo. Pirminiam skaičiavimui norint įsivertinti ir galutinai apsispresti dėl konstrukcinės schemos ir užsiduodamų parametrų dydžių pakanka tokių trijų režimų.

Įsivertinant kokios konstrukcinės schemos bus panaudoti variklio mazgai galima pasirinkti būtinas skaičiavimams terminų bei mechaninių naudingo veikimo koeficientų reikšmes.

Skaičiavimai bus atliekami naudojantis tipinėmis skaičiavimo metodikomis. Sakičiavimai bus atliekami netik skirtingiems režimams, bet ir kiekvienas režimas sakičiuojamas naudojant keletą reikšmių išeitinių duomenų, t.y. skirtingi kompresoriaus suspaudomo laipsniai, skirtingos temperatūros prieš tubiną dydžiai.

4.2. Variklio parametrų parinkimas, analizuojant skaičiavimų rezultatus

Skaičiavimams naudotos kompresoriaus suspaudomo lpsnio π_K reikšmės 8, 10, 12. Didesniųjų reikšmių įgyvendinimui reikėtų tobulo didelio reaktyvumo išcentrinio kompresoriaus darbo rato. Ir realiai iš vienos tokio kompresoriaus pakopos pasieti tokią suspaudimo reikšmę yra didelis iššūkis. Matomai reikėtų panaudoti ašinę busterinę pakopą. Tačiau teoriškai didesnio suspaudimo laipsnio naudojimas leistų pilniau išnaudoti regeneracijos proceso naudojimo, sūlomajame variklyje, galimybes. Gana didelį užsiduodamų duomenų variacijų skaičių lemia tai, kad norima turėti galimybę pasirinkti optimaliausią visais požiūriais naudingiausią konstrukcinės schemos ir gerų variklio parametrų santykį.

Dujų temperatūros reikšmę prieš turbiną prieš turbiną verta rinktis 1000 K, 1100 K maksimum 1200 K. Tokio pasirinkimo priežastis ta, kad esant šiems dydžiams nereikalinga sudėtinga, didelių oro sanaudų reikalaujanti aušinimo sistema. Naudojant šiuolaikines medžiagas net esant 1200 K temperatūrai turėtų pakakti gan paprastos aptekamos turbo kompresoriaus turbinos darbo rato ir mentelių aušinimo sistemos, kuri nereikalaus nedidelių oro sanaudų.

Matomai nedidelių gabaritų varikliuose ženkliai padidinti dujų temperatūra prieš turbiną leistu tik termoemisinės aušinimo sistemos įgyvendinimas. Šio tipo sistemos nereikalauja papildomų oro sanaudų t. y. savo ruožtu neturi įtakos degalų sanaudoms ir remiantis jau atliktų tyrimų bei eksperimentų duomenimis yra ne kelis o net keletą dešinčių kartų efektyvesnės nei orinės aušinimo sistemos. Esmė ta, kad detalės dirbančios aukštų temperatūrų aplinkoje yra padengiamos specialios sudėties termoemisinėmis dangomis. Prie didelių temperatūrų juose vyksta aktyvus termoemisijos procesas, ko pasekoje stipriai mažėja paviršiaus temperatūra ir ganauma tam tikra elektros srovė, kurią galima panaudoti orlaivio elektros sistemoje. Iš šio tipo sistemų tikimasi daug, kadangi jos siūlo didelį efektyvumą su minimaliais gabaritų ir masės padidėjimais.

Lentelė 1. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis H - 0 m, greitis 0 M

	T_K	1000			1100			1200		
	π_K	8	10	12	8	10	12	8	10	12
C_{pcp}		1141.49	1145.84	1149.18	1162.29	1166.64	1170	1183.1	1187.44	1190.78
q_{deg}		0.012	0.011	0.009	0.015	0.014	0.013	0.018	0.017	0.016
$N_{e\ sant}$		137.93	131.46	125.87	156.27	149.8	144.21	179.33	168.61	167.62
C_e		0.313	0.301	0.257	0.346	0.336	0.325	0.361	0.363	0.344

Lentelė 2. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis 3000 m, greitis 0.3M

	T_K	1000			1100			1200		
	π_K	8	10	12	8	10	12	8	10	12
C_{pcp}		1138.67	1142.79	1145.96	1159.26	1163.59	1166.76	1180.27	1184.39	1187.56
q_{deg}		0.013	0.011	0.0108	0.016	0.015	0.009	0.019	0.018	0.017
$N_{e\ sant}$		141.12	134.15	128.86	159.6	152.7	147.00	178..1	171.19	165.85
C_e		0.331	0.295	0.302	0.361	0.354	0.271	0.384	0.378	0.369

Lentelė 3. Variklio santykiniai parametrai, kai skrydžio aukštis 6000 m, greitis 0.5M

	T_K	1000			1100			1200		
	π_K	8	10	12	8	10	12	8	10	12
C_{pcp}		1136.77	1140.39	1143.53	1157.57	1161.19	1164.33	1178.37	1181.99	1185.13
q_{deg}		0.013	0.012	0.011	0.016	0.015	0.014	0.019	0.018	0.017
$N_{e\ sant}$		142.32	142.28	142.24	154.78	154.72	154.67	168.04	168.01	167.96
C_e		0.329	0.304	0.278	0.372	0.349	0.326	0,407	0.385	0.364

Siūlomo projekcinio variklio parametrus rinktis reikia laikantis pagrindinių nuostatų, kad tai nedidelių gabaritų lengvas ir nedidelės galios variklis, skirtas naudoti mažuose lėktuvuose bei didesniuose bepiločiuose orlaiviuose. Kadangi visumoje tiek skaičiavimo metodikomis tiek darbo sąlygomis turbo sraigčiai varikliai yra artimi turbo veleniniams varikliams yra naudinga projekto lygmenyje numatyti galimybę turėti ir turbo veleninį variklio variantą. Analizuojant tokių variklių projektus ir gamybos praktiką, pasiūlą rinkoje, stebimas beveik visų gamintojų TSV konvertacijos į TVV arba atvirkščiai naudojimas

Kadangi be tradicinių orlaivių variklių galima naudoti ir didesniuose bepiločiuose orlaiviuose reikia vertinti ir tokių orlaivių komponavimo schemas. Šio tipo orlaiviuose dažnai naudojami stumiančiojo tipo oro sraigtai beje tokių sprendimų galima sutikti ir nedideliuose bendrosios paskirties orlaiviuose, todėl yra tikslinga numatyti projekto lygmenyje variklio naudojimą su abiejų tipų oro sraigtais.

Norint turėti komerciškai sėkmingą projektą yra reikalinga įvertinti gamybos ir variklio eksploatacinius kaštus. Jei projekto lygmenyje įdedami labai dideli parametrai užsiduodami dideli suspaudimo laipsniai kompresoriuje bei didelės darbo dujų temperatūros prieš turbiną ganaumi dideli efektyvumo rodikliai, gerai deginami degalai, maža kenksmingų medžiagų emisija su išmetamomis dujomis, tačiau tuo pat metu sudėtingėja kompresoriaus konstrukcija, reikalinga galinga turbinos mentelių bei disko aušinimo sistema. Tai reikalaus didesnių oro sraudų aušinimui, kas automatiškai

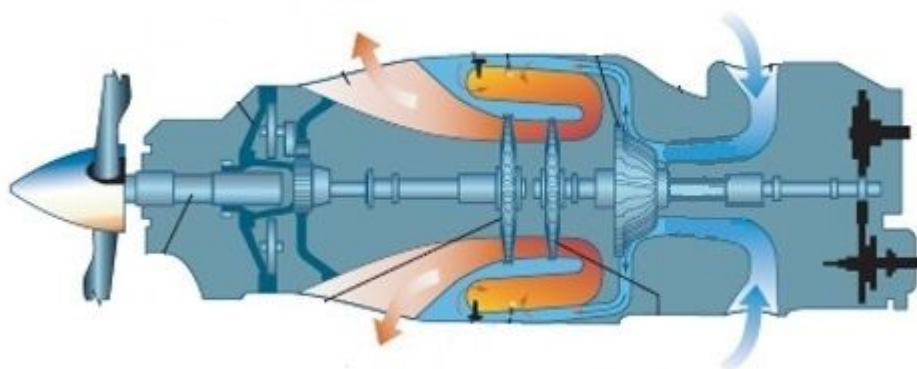
didins degalų sanaudas, brangins turbinos mentelių bei disko gamyba, bus reikalingas tinklas vidinių kanalų aušinimo oro cirkuliacijai. Užsiduodant didelį suspaudimo laipsnį kompresoriuje reikia turėti galvoje, kad tam įgyvendinti gali nepakakti vienos pakopos konstrukcijos, tektų naudoti busterinę pakopą arba išvis dviejų pilnaverčių pakopų konstrukciją.

Variklio konstrukcinės schemas pasiūlimo suformavimui, įvertinant nedidelių bendrosios paskirties orlaivių eksploatacijos sąlygas, skaičiavimams pasirenkami trys variklio darbo režimai: vienas maksimalios galios režimas, kai skrydžio aukštis 0 metrų ir skrydžio greitis 0M; kitas – kreiserinis, kai skrydžio aukštis 3000 metrų, skrydžio greitis 0.3M; ir trečias – nominalus kai skrydžio aukštis 6000 metrų ir greitis 0.5M. Vėliau galutinai suformavus variklio konstrukcinę schemą, galutinai pasirinkus valdymo dėsnį ir derinant variklį priekonkretoaus orlaivio skaičiuotų variklio darbo režimų kiekis gali būti didinamas. Matomai atskirų suderinimų reikalautų ir tos variklio versijos, kurios būtų naudojamos bepiločiuose orlaiviuose.

Kiekvieno skaičiuoto darbo režimo parametrai skaičiuojami kai kompresoriaus suspaudimo laipsnis π_K – 8; 10; 12, dujų temperatūra prieš turbiną T_4 – 1000; 1100 ir 1200 K.

Į aukščiau pateiktas lenteles yra surinkti santykiniai variklio parametrai, kurie geriausiai gali apibūdinti jo galią ir degalų sanaudas. Daugiausia dėmesio skirta santykinėms degalų sanaudų q_{deg} , santikinei ekvivalentinei galiai $N_{e\ sant}$ ir savitųjų santykinėms degalų sanaudų C_e kitimui priklausomai nuo užsiduotų parametru kombinacijos.

Išanalizavuos skaičiavimų rezultatus sulomam projektuoti turbo sraigtiniam varikliui išeitinius skaičiavimams duomenis būtų siūloma pasirinkti sekančiais: suspaudimo laipsnis kompresoriuje π_K minimaliai 10, geriau 12; dujų temperatūra prieš turbiną T_4 – 1100 K. Lememas kriterijus



26.pav. Siūlomo vaiklio konstrukcinė schema

pasirenkant dujų temperatūrą prieš turbiną – turbinos darbo rato disko ir mentelių aušinimo sistemos paprastumas, dar geriau jei pavyktu visai atsisakyti aušinimo.

Reikiamus suspaudimo laipsnius gauti paprasčiausia bus naudojant išcentrinio tipo kompresorių. Išskirtinis šio tipo kompresorių bruožas – gaunami dideli suspaudimo laipsniai vienoje pakopoje. Pasirinktus skaičiavimams suspaudimo laipsnio dydžius realiai galima gauti vienoje kompresoriaus pakopoje. Literatūroje teigiama, kad šandies egzistuoja realūs išcentriniai kompresoriai, kuriuose vienos pakopos suspaudimo laipsnis 14. Matomai realizuoti didesnius suspaudimo laipsnius nei 12 geriau pavyktu naudojant prieš išcentrinę pakopą ašinę busterinę pakopą. Laikydami pasirinktų išeities sąlygu liksime prie maksimalaus slėgio kompresoriuje 12, tokiu būdu naudojamas vienos pakopos išcentrinis kompresorius.

Degimo kamerą naudosime žiedinio tipo. Tai šiandien plačiausiai aviaciniuose varikliuose naudojamo tipo degimo kameros. Šio tipo kamerų privalumai: minimalūs dydžiai bei masė, minimalus vidinio plotas, minimalūs slėgio nuostoliai, didelis liepsnos plitimo greitis. Didesnis trūkumas nėra lengva suderinti degalų ir oro srautus bei temperatūrų laukus išėjime.

Išeinant iš naudojimo sąlygų ir norint užsitikrinti pakankamai paprastą konvertacijos į įvairius variantus galimybę, naudingiausia būtų panaudoti taip vadinamą „apversto“ tipo konstrukcinę variklio schemą su vienos pakopos išcentrinio tipo kompresoriumi, vienos pakopos ašine turbo generatoriaus turbina ir vienos pakopos ašine laisvąją jėgos turbina. Reduktorius integruotas į variklio korpusą, degimo kamera priešrovinė, žiedinė. Tokiu atveju turinti gamyboje du išmetimo tūtų tipus, galima lengvai variklį derinti su traukiančiu arba stumiančiu sraigtu. Nuėmus reduktoriaus modulį ir turinti gamybėje dviejų tipų laisvosios jėgos turbinos velenus, gana nesunkiai variklį galėsime konvertuoti į turbo veleninį variantą.

Variklio valdymo ir reguliavimo sistema FADEC tipo. Variklis turi pilną jutiklių komplektą reikalinga valdyti, reguliuoti ir apriboti jo darbą. Matomai pats efektyviausias variantas, kurį vertėtų įgyvendinti šioje konstrukcijoje būtų parinkti kintamą variklio valdymo dėsnį, t. y. skirtingus valdymo dėsnius skirtingiems variklio darbo režimams. Šis sprendimas vertinant išanalizuotą medžiagą leistu maksimaliai tiksliai sureguliuoti variklio darbą kiekviename režime ir visumoje turėti geriausius galios ekonominius rodiklius.

Išanalizavus skaičiavimų rezultatus ir teorinę medžiagą išdėstyta skyrelyje apie regeneracijos procesą, galima teigti, kad vienareikšmiškai galima turėti 20 % mažesnes degalų sanaudas. Neginčijamai įrodyta, kad darbo ciklo patobulinimas regeneracijos procesu, didina ciklo terminio naudingumo koeficientą. Tiesa pasiekti geriams rezultatams reikia įgyvendinti kai kurias specifines sąlygas. Regeneracijos proceso naudingumas labai priklauso nuo suspaudimo laipsnio kompresoriuje, kuo didesnis suspaudimo laipsnis tuo didesnis terminio naudingumo koeficientas. Dideliems suspaudimo laipsniams pasiekti reikės sudėtingesnės konstrukcijos kompresoriaus. Jei apnaudoti papildomą ašinę busterinę pakopą, kurios suspaudimo laipsnis $1.4 \div 1.6$, tai turint išcentrinę pakopą

kurios suspaudimo laipsnis $10 \div 12$, pilnas kompresoriaus suspaudimo laipsnis pakiltų iki $14 \div 19$. Busterinės pakopos įvedimas neturėtų labai smarkiai padidinti kompresoriaus masės.

Sekanti problema, kurios išsprendimas turi įtakos regeneracijos naudojimui – šilumokaitis. Tai pagrindinis mazgas reikalingas norint įgyvendinti regeneracijos procesą bet kuriame variklyje. Šiai dienai geriausiai išnagrinėti yra vamzdiniai šilumokaičiai, kurie pakankamai plačiai yra naudojami promoninės paskirties dujų turbiniuose jėgainėse. Tačiau jie pakankamai dideli ir masyvūs. Vertinama kad tokio tipo šilumokaičio audojimas agli padidinti aviacinio variklio masę iki 80 %. Tai netenkinantis rezultatas. Matomai verta giliau išnagrinėti kitų tipų šilumokaičių darbą. Perspektyviais atrodo besisukantys šilumokaičiai, nors būtent jie dabar yra mažiausiai išnagrinėti. Kitas būdas net ir vamzdinių šilumokaičių gamybai išnaudoti visas perspektyvių gamybos technologijų teikiamas galimybes. Pvz šilumokaiti gaminti naudojant 3D spausdintuvą. Šią pačią technologiją panaudoti ir busterinės kompresoriaus pakopos gamybai.

Pažangių gamybos technologijų panaudojimas leis taupyti šių mazgų masę bei gabaritus. O vertinant regeneracijos proceso naudojimo aglimybe nedideliame variklyje, tai labai svarbu. Jei gebame pagaminti efektyvų mažos masės ir dydžių šilumokaitį, rinkai galime siūlyti daug ekonomišką variklį. Tuo atveju eksplotacinių kaštų mažėjimas padengs didesnę variklio kainą.

Pirminė išvada regeneracijos proceso naudojimas siūlomos konstrukcijos variklyje nėra būtinas. Tačiau išsprendus minėtas technines technologines problemas ir panaudoję šį procesą turėtume įnovatyvų, perspektyvų variklį.

4.3. Variklio valdymui reikalingų jutiklių komplekto analizė

Bet kokio dydžio bei galios šiuolaikiai TRV, TSV ar TVV, yra sudėtingi įrenginiai ir norint užtikrinti jų efektyvų veikimą, darbo režimų reguliavimą, techninės būsenos stebėseną, reikalinga naudoti daug įvairios paskirties jutiklių. Tam tikros pataisos naudojamų jutiklių nomenklatūroje atsiranda priklausomai nuo to, kokio tipo variklyje jie naudojami. Pvz. TRV dėl konstrukcinių ypatumų buna paprastesnės vibracijų stebėsenos sistemos, nereikalingos signalizacijos sistemos dėl viršyto sukamojo momento didžio.

Aplamai visa informacija, nuskaitoma jutiklių pagalba, naudojama orlaivio įgulai informuoti apie jėgainės parametrus, taip pat kaip informacija jėgainės automatinio valdymo ir reguliavimo sistemos darbe ir aliarminių pranešimų formavimui stebėsenos ir įspėjimų sistemose, taip pat įrašamas objektyvios kontrolės sistemose.

TSV ir TVV tapusavyje yra labai panašūs tiek konstrukciniais sprendimais tiek darbo režimais, todėl labai dažni atvejai, kai nedidelės ar vidutinės galios TSV yra konvertuojami į TVV arba atvirkščiai.

Elementariai TSV darbo kontrolei užtikrinti pakaktų šių jutiklių: degalų slėgio jutiklio; motorinės alyvos kiekio, slėgio bei temperatūros jutiklių; dujų temperatūros prieš turbiną jutiklio (termoporos); variklio rotorius apsisukimų skaičiaus jutiklio (tachometro); maksimaliai leidžiamų rotorius sūkių jutiklis; sukamo momento jutiklis; vibracijų lygio jutiklis.

Tačiau kiekvienas variklis turi ir valdymo bei reguliavimo sistemą. Ir nepriklausomai nuo to kokio tipo yra ši sistema, jos patikimam darbui užtikrinti reikalinga žinoti reikšmes kai kurių papildomų parametrų. Pvz. aplinkos temperatūra, pilnutinis bei statinis slėgiai. Dažniausiai naudojamos hidromechaninės arba šiuolaikės FADEC tipo valdymo ir reguliavimo sistemos. Taip pat reikalinga ir sistema, kuri valdo propelerio žingsnį, o per jį ir apsisukimus. Tai yra suderinanti variklį su propeleriu.

Variklyje reikės matuoti motorinės alyvos temperatūrą ir slėgį, darbo dujų temperatūrą prieš turbo generatoriaus turbiną, turbo generatoriaus, laisvosios jėgos turbinos bei oro sraigto apsisukimų skaičių. Saugos užtikrinimui papildomai reikės matuoti sukamojo momento reikšmę ant oro sraigto veleno ir variklio vibracijų lygį. Pastarieji du jutikliai turės įnicijuoti automatinų variklio stabdymą jei kuris nors vienas iš jų kontroliuojamų dydžių bus viršytas.

Reduktoriuje būtų pravartu turėti magnetinį jutiklį signalizuojanti metalinių drožlių atsiradimą.

Remiantis tuo, kad aplanai turbo sraigtiniai varikliai pasižymi labai nedidelėmis motorinės alyvos sanaudomis galima atsisakyti motorinės alyvos lygio jutiklio. Nedideliame variklyje galima tikėtis valandinių motorinės alyvos sanudų apie 100 gr/val. Todėl jos lygio matavimo atsisakymas leistu supaprastinti sistemas, sumažinti jų masę [23].

Prietaisai skirti slėgio ar slėgių skirtumui matuoti vadinami manometrais. Aviacijoje manometrais matuojama dujų ir skysčių slėgiai. Pagal matavimo būdą monometrai yra skirstomi į mechaninius, elektromechaninius bei elektrinius.

Mechaniniai manometrai buna tokių rūšių:

- deformaciniai manometrai – slėgis matuojamas pagal jautraus elemento deformacijas;
- skysčio – deformaciniai manometrai - slėgis matuojamas, lyginant su skysčio stulpelio svoriu;
- svorio – cilindriniai manometrai – slėgis vertinamas matuojant stūmoklio svorį.

Aviacijoje naudojami tik deformaciniai manometrai.

Elektro mechaniniai manometrai skiriasi nuo mechaninių tuo, kad juose jautriojo elemento deformacija keitiklyje yra keičiama į proporcingą elektrinį signalą. Deformaciniai ir elektromechaniniai manometrai matuoja slėgį intervale nuo kelių Pa iki dešimčių Mpa.

Elektrinių manometrų veikimas grindžiamas medžiagų fizinių savybių priklausomybe nuo slėgio. Tokiomis savybėmis gali būti; varžos kitimas nuo slėgio, temperatūros kitimas nuo slėgio, jonizavimo srovės priklausomybė nuo slėgio. Be motorinės alyvos slėgio reikės dar žinoti ir degalų slėgį prieš purkštukus, taigi reikės dar vieno manometro komplekto [21].

Deformaciniai manometrai dar vadinami tiesioginio nuskaitymo prietaisais. Juose jutiklis ir rodklis sudaro vieną mazgą. Jų konstrukcija išimtinai organizuojama Bourdono vamzdžio principu. Pagrindinis šių manometrų trūkumas, tas kad juos reikia montuoti ten, kur matuojamas slėgis. Bet kokių kitų atveju reikia organizuoti slėgio perdavimo linijas, o tai kelia labai daug sudėtingų techninių problemų, bloginą matavimų patikimumą. Išeinant iš šių aplinkybių pasirinksiame abiejų slėgių matavimus atlikti elektromechaniniais manometrais [21].

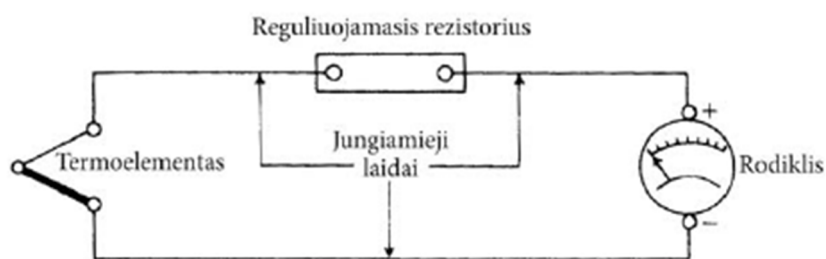
Labai dažnai praktikoje aviacinių variklių tepimo sistemose bei degalų dozavimo sistemose slėgiui matuoti naudojami elektromechaniniai manometrai su potenciometrinio slėgio keitikliu. Matuojamo slėgio diapazonas būna nuo 0 iki 15 MPa. Tokių prietaisų paklaidos neviršija 4 % ribos. Gaminama daug šio tipo prietaisų, kas daro jų kainas pakankamai nedidelėmis.

Taigi motorinės alyvos slėgiui matuoti galima naudoti šio tipo manometrą, kurio matavimo ribos iki 800 kPa.

Matuoti degalų slėgiui prieš purkštukus galima naudoti elektro mechaninį manometrą su indukcinio keitikliu arba tokios pačios sistemos manometrą, kurie aprašyti anksčiau, bet matavimo ribos čia reikalingos daug platesnės iki 15 MPa.

Toliau yra reikalingi du termometrai. Vienas motorinės alyvos temperatūrai matuoti, kitas dujų prieš turbinos pakopą temperatūrai matuoti. Kadangi matuosime skirtingų medžiagų temperatūras ir skirtinguose diapazonuose, bus reikalingi du skirtingi termometrai. Alyvos temperatūrai matuoti reikės prietaiso su matavimo riba iki 120°C, o dujų termometro matavimo riba iki 1400°C.

Pagal veikimo principą termometrai skirstomi net į 7 grupes. Aviacijoje plačiausiai naudojami termometrai su varžos, termoelektrinių porų, bimetalų juostelių ir pirometriniais temperatūrai jautriais elementais (TJE). Dujų temperatūros prieš turbiną matavimui, vienareikšmiškai dėl reikiamų matavimų ribų, galėsime naudotis tik termometru su termoelektrinės poros jutikliu [21].

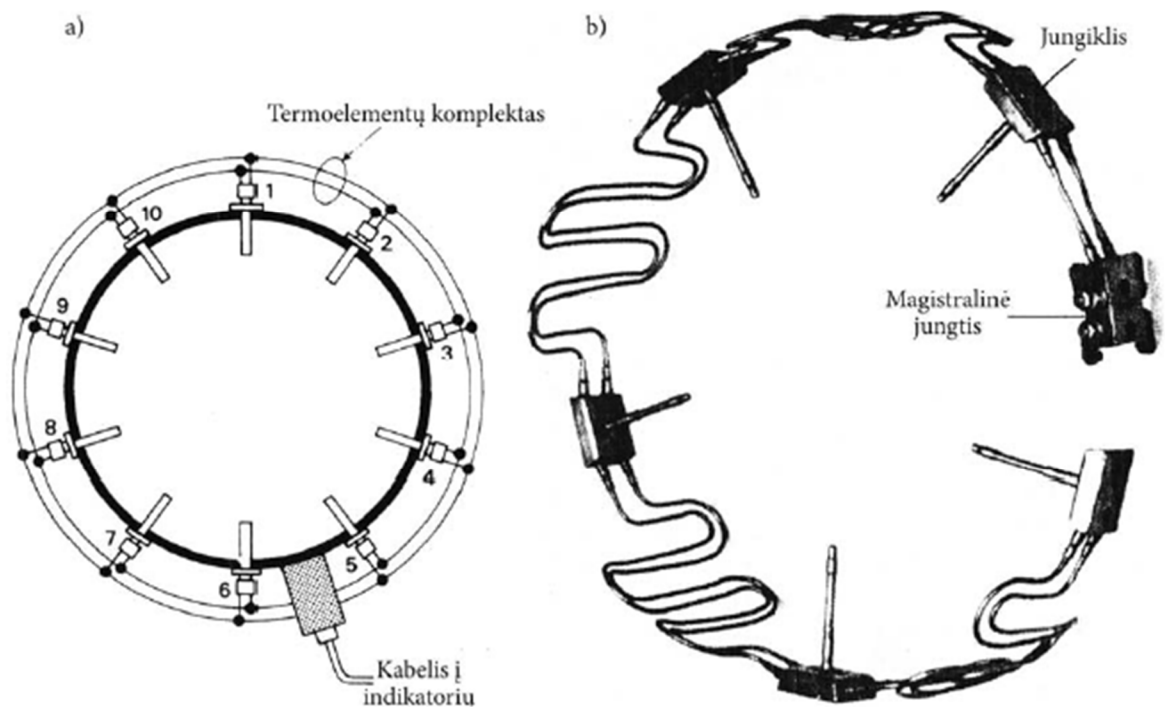


27.pav. Termoelektrinio termometro schema [21]

Termoelektrinio termometro (pav. 27) veikimo principas pagrįstas tuo, kad iš skirtingų medžiagų pagamintų dviejų laidininkų, vadinamų termopora, sandūroje, esant temperatūros skirtumui tarp jungimo vietos ir laisvųjų laidininkų galų, atsiranda terminė elektrovaros jėga. Laidininkų jungtis, besiliečianti su įkaitusiais objektais, vadinama karštąją jungtimi, o priešinga – šaltąją, arba laisvąją jungtimi. Teigiamuoju (arba pirmuoju) termoporos šaltosios jungties elektrodu laikomas tas, nuo kurio teka terminės EVJ sukelta srovė. Kitas termoporos šaltosios jungties elektrodas vadinamas neigiamuoju (arba antruoju). Teoriškai aprašyti termoporoje atsirandančios terminės EVJ priklausomybę nuo jos karštosios ir šaltosios jungčių temperatūros skirtumo yra sudėtinga, todėl ji nustatoma eksperimentiniu būdu ir pateikiama lentelių arba grafikų pavidalu [21].

Pagal matavimų paskirtį šie termometrai skirstomi į 3 pagrindines grupes:

- stūmoklinių variklių cilindrų galvučių temperatūrai matuoti;
- greitai judančių dujų temperatūrai matuoti;
- reaktyvinių variklių išmetamųjų dujų temperatūrai matuoti.

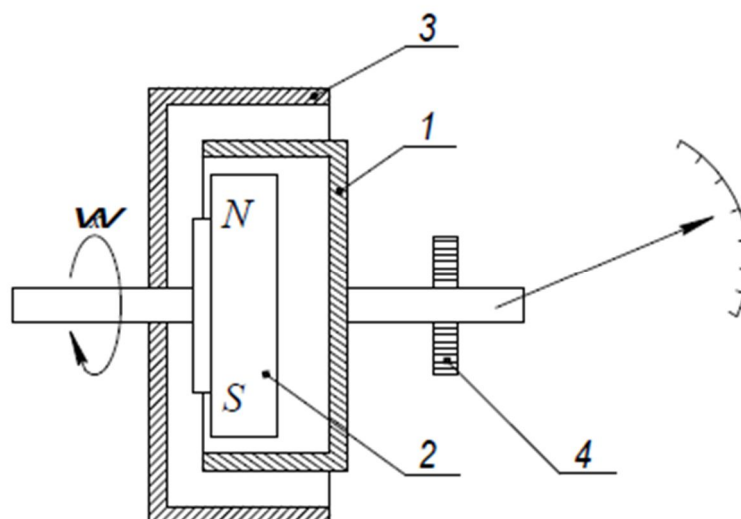


28.pav. Dujų srauto temperatūros jutikliai: a) 5-ių JTE porų; b) 5 JTE [21]

Laidininkų jungtis, besiliečianti su įkaitusiais objektais, vadinama karštąją jungtimi, o priešinga – šaltąją, arba laisvąją jungtimi.

Dar variklyje reikalinga žinoti dujų generatoriaus, laisvosios jėgos turbinos bei oro sraigto apsisukimų skaičių. Tam reikės trijų komplektų tachometrų. Prietaisų lentoje galima apseiti

dviemis rodikliais, t. y. dujų generatoriaus ir laisvos turbinos sūkių rodmenis išvedant į rodiklį su



29.pav. Magnetoindukcinio tachometro schema. Schemoje 1 – cilindras, 2 – magnetas, 3 – magnetolaidis, 4 - spyruoklė [21]

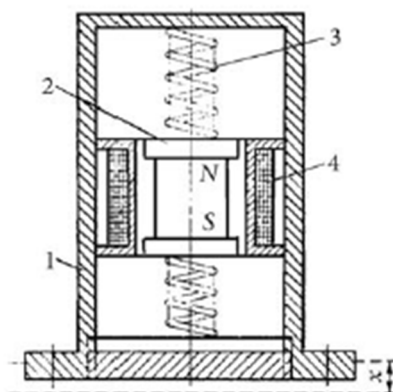
dviem skalėm ir rodyklėm. Šie parametrai turi būti matuojami pakankamai tiksliai paklaidų zona nuo 0.5 iki 1 %. Yra žinoma nemažai sūkių dažnio matavimo metodų; pvz. išcentrinis, laikroдинis, rezonansinis, stroboskopinis, magnetoindukcinis, pastoviosios srovės ir kt.

Tachometru JE ir besisukancios magnetines sistemas (pav. 29) tvirtinamos ant atskirų ašių. Magnetinei sistemai sukantis dažniu, proporcingu variklio veleno sukimosi dažniui, dėl magnetinės indukcijos jautriojo elemento medžiagoje indukuojasi sukurinės srovės, kurios savo ruožtu sukuria savąjį magnetinį lauką. JE ir nuolatinių magnetų magnetiniams laukams veikiant vienas kita, atsiranda sukimo momentas, JE ašis pasisuka. Pasisukant JE ašiai, užsisuka su ja sujungta spyruoklė ir sukia pasipriešinimo momentą, atitinkanti ašies posukio kampą. Esant pastoviam magnetinės sistemos sukimosi dažniui, JE pasisuks tokio dydžio kampu, kuriam esant atoveikio momentas susilygins su sukamuoju jėgos momentu. Taigi tachometro JE ašis pasisuks kampu, atitinkančiu matuojamą sūkių dažnį [21].

Pilnam variklio darbo vertinimui, kontrolei, saugumui užtikrinti negalima apseiti be vibrometro. Vibrometrai aviaciniai prietaisai skirti:

- matuoti lėktuvų variklių vibracijų amplitudėms;
 - pateikti matavimo rezultatus indikatoriuose;
 - signalizuoti apie leistinų vibracijų parametrų viršijimą;
- perduoti matavimų rezultatus į duomenų registravimo aparatūrą.

Aviaciniuose vibrometruose (pav. 30) taikomas inercinis metodas, leidžiantis matuoti objekto



30.pav. Vibracinio keitiklio schema Schemoje 1 – korpusas, 2 – inertiškoji masė, 3 – spyruoklė, 4 – magnetoindukcinis keitiklis [21]

vibracijas, kurios stangriai sujungtos su objektu masės atžvilgiu. Šiuo atveju vibracijų parametru matavimo keitiklis (toliau – vibracinis keitiklis) sudarytas iš korpuso 1 (vibruojančiojo elemento), sujungto spyruokle 3 su inertiškąja mase – magnetu 2 (nevibruojančiuoju elementu) ir magnetoindukcinio elemento 4, kuris sukelia elektrinius signalus, proporcingus matuojamoms vibracijoms. Kadangi mūsų variklis nedidelės galios, tai pilnai pakanka kontroliuoti vibracines deformacijas ir joms viršyjus nustatytą dydį, ispėti pilotus bei avariniu būdu sustabdyti variklį, kad būtų išvengta sunkesnių pasekmių [21].

4.4. Siūlomo variklio konstrukcijos masės analizė

Yra logiška, kad nedidelių gabaritų ir galios turbo sraigtiniam varikliui keliami griežti masės reikalavimai. Bandant prognozuoti siūlomo variklio masę bus remiamasi įvairių duomenų bazių analizėmis.

Susidaryti pirminę prognozę, kokią kuris variklio mazgas galėtų turėti masę jei būtų vienos ar kitos konstrukcijos. Taip laipsniškai žingsnis po žingsnio būtų preinama prie konkrečios variklio konstrukcijos su tam tikrais įvykdytais užsiduotais parametrais. Galbūt susiklostytu situacija, kada reikalinga koreaguoti užsiduotus parametrus, nes neįmanoma įgyvendinti pirminių pasirinktų reikšmių.

Situacija kada realūs masės rodikliai didesni nei užsibrėžiami projektuose, yra gana dažna.

Turbo sraigtinį variklį galima susidalinti į 9 arba 10 mazgų. Naudojant esamų konstrukcijų statistinę analizę, susidaro vaizdas, kai galima teigti, kad kiekvienam iš šių mazgų tenka tam tikra variklio masės procentinė dalis. Apytiksliai masės pasiskirstymas šiuose mazguose yra sekantis:

- 1) įleidimo įrenginys - 2 %;
- 2) kompresorius - 26%;
- 3) degimo kamera - 6%;
- 4) korpusas - 4%;
- 5) turbina - 20%;
- 6) išmetimo sistema - 3%;
- 7) agregatų pavaros - 4%;
- 8) variklio sistemos - 10%;
- 9) reduktorius - 25%.

Kaip matome didžiausią masę turi reduktorius. Jam vienam tenka iki ketvirtadalio visos variklio masės. Na o sumoje kompresoriui, turbinai ir reduktoriui tenka du trečdaliai variklio masės. Dar iki 10% variklio masės atitenka variklio sistemoms.

Pirmu priartėjimu prognozuojamą variklio masę galima įsivertinti per santykinę masę. Šiuolaikiniams varikliams, remiantis statistinių duomenų analize, šis rodiklis svyruoja ribose nuo 0.17 iki 0.33 kg/kW. Taigi atlikus pačius parasčiausius aritmetinius skaičiavimus tampa aišku, kad užsiduotos galios variklio masė be oro sraigto svyruos nuo 60 kg iki 116 kg. Tai užsiduota siekiama konstrukcijos masė 100 kg yra realiai pasiekiamas dydis. Įgyvendinus šią sąlygą santykinė konstrukcijos masė būtų 0.286 kg/kW.

Tada variklio mazgų masės galėtų būti sekančios: kompresorius 26 kg; turbina 20 kg; reduktorius 25 kg ir bendrai variklio sistemų masė iki 10 kg.

5. NEDIDELĖS GALIOS TSV SKAIČIAVIMO UŽDUOTIES METODIKOS PARENGIMAS

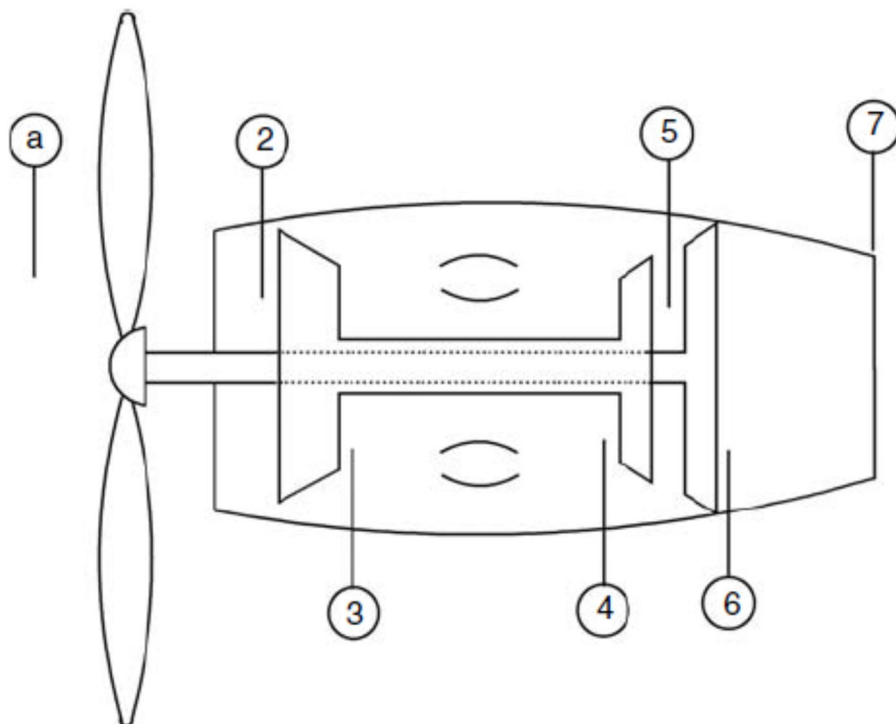
Tiriamąjį analitinį darbo praktinio taikymo produktas yra sudarytos kelios skaičiavimo užduotys. Jos skirtos 3-čio kurso aviacijos krypties bakalauro programos studentams. Užduotys pateikiamos aviacinių variklių modulyje, toje jo dalyje kur studijuojamos turbo reaktyvinių variklių konstrukcinės schemos bei veikimo principai. Užduoties atlikimas turėtų padėti geriau įsisavinti teorinę medžiagą bei padėti įgyti pirminius įgūdžius turbo reaktyvinių variklio termodinaminių skaičiavimų atlikime.

Užduotyje nustatomi išieitiniai skaičiavimui reikalingi duomenys: ekvivalentinė variklio galia N_e , suspaudimo laipsnis kompresoriuje π_K , nusakoma skaičiuojamojo variklio komponentė, t. y. ar variklis su laisvąja jėgos turbina ar vieno veleno bejos. Šis reikalavimas nėra griežtai ribojamas. Galingų šiuolaikių TSV ir TVV konstrukcijose vyrauja daugiaveleninės schemos su laisvąja jėgos turbina. Na o mažos galios nedidelių variklių schemos pinai gali būti siūlomos ir vieno veleno. Čia pagrindinis aspektas nedideli gabaritai ir masė, harmoningai derantys užsiduoti variklio galiai pasiekti. Išeinant iš šių sąlygų studentui siūloma pačiam apsispręsti, kurią iš konstrukcinių schemų su laisvąja jėgos turbina ar be jos naudoti skaičiuojamame variklyje. Svarbiau, kad studentas gebėtų aiškinamajame darbo rašte aiškiai pagrįsti, savo sprendimo priežastis.

Skaičiavimams nustatomi keli variklio darbo režimai. Kaip taisyklė maksimalios galios (pakilimo) režimas stabinėse sąlygose, t.y. skrydžio greitis ir aukštis lygūs 0. Nominalus (maksimalios trukmės galios) režimas maksimaliame skrydžio aukštyje maksimaliu greičiu. Ir nors vienas kreiserinis režimas tam tikrame aukštyje tam tikrų greičiu. Kada variklis taikomas konkrečiam lėktuvui tokių, kreiserinių, režimų parenkama keletas. Skaičiavimams reikalingus aplinkos parametrus slėgį p_a bei temperatūrą T_a , studentas turi pasirinkti iš standartinės atmosferos parametrų lentelės.

Skaičiavimui atlikti studentas turi nubraižyti sakičiuojamojo variklio schemą, kurioje pažymėti būdingi skerspjūviai. Metodiniuose nurodymuose yra pateikiamas tokios schemos su būdingais pjūviais pavyzdys.

Metodiniuose nurodymuose pateikiami, parametrai būtini skaičiavimams atlikti, tokie kaip terminiai bei mechaniniai naudingumo koeficientai pateikiami intervalais vertinant iš statistinės analizės pozicijų. Konkretaus koeficiento dydžio pasirinkimo teisė yra paliekama darbą atliekančiam studentui. Tai pat pateikiami pastovūs dydžiai t. y. konstantos ir rodikliai. Kaip pavyzdį galima paminėti adiabatės rodiklį k , kuris turi skirtingas reikšmes orui kompresoriuje ir darbo dujoms už degimo kameros. Belieka tik teisingai panaudoti duotąsias reikšmes.



31.pav. TSV skaičiavimo schema [22]

Atlikdamas darbą atudentas turi pateikti trumpus komentarus, kodėl viename ar kitame žingsnyje atliko vienokį ar kitokį pasirinkimą. Atliktų skaičiavimus studentas turi sudaryti darbo kūno slėgio ir temperatūros kitimo būdinguose variklio skerspjūviuose grafikus.

Žemiau pateikiamas tokios užduoties pavyzdys.

Skaičiuojamojo turbo sraigtinio variklio schema

Schemą galima susidaryti nekreipiant dėmesio į konkrečius konstrukcinius sprendimus. Svarbiausia kad schemoje būtų įsiurbimo pjūvis, išėjimo iš kompresoriaus pjūvis ir t.t. Vienokio arkitokio tipo konstrukcija yra įvertinama koeficientais.

Užsiduodamos reikšmės:

Variklio galia - N_e kW.

Kompresoriaus suspaudimo laipsnis - π_k .

Dujų temperatūra prieš turbiną - T_4 K.

Pateikiami skaičiuojami variklio darbo režimai:

I-as $M_S = 0$; $H_S = 0$;

II-as $M_S = M_{kreis}$; $H_S = H_{kreis}$;

III-as $M_S = M_{max}$; $H_S = H_{max}$.

Oro parametrai (temperatūra, slėgis, garso greitis) sakičiuojamuosiuose darbo režimuose pasirenkami iš standartinės atmosferos lentelių.

Adiabatės rodiklis orui - $k_o = 1.4$.

Adiabatės rodiklis darbo dujoms - $k_d = 1.33$.

Dujų pastovioji orui - $R_o = 287$ J/kg.

Dujų pastovioji darbo dujoms $R_d = 288$ J/kg.

Skaičiavimo algoritmas.

1) Pjūvis įeinant į kompresorių

1.1) slėgis

$$p_2 = p_a \sigma_{i\dot{e}j} \left(1 + \frac{k_o-1}{2} M_S^2\right)^{\frac{k_o}{k_o-1}}, \quad (5.1)$$

čia: $\sigma_{i\dot{e}j}$ – slėgio atsistatymo koeficientas įsiurbimo įrenginyje, įprastai jis lygus $0.96 \div 0.98$.

1.2) temperatūra

$$T_2 = T_a \left(1 + \frac{k_o-1}{2} M_S^2\right). \quad (5.2)$$

2) Pjūvis išeinant iš kompresoriaus

2.1) slėgis

$$p_3 = p_{i\dot{e}j} \cdot \pi_k. \quad (5.3)$$

2.2) darbas

$$W_3 = \frac{k_o}{k_o-1} R_o T_{i\dot{e}j} \left(\pi_k^{\frac{k_o-1}{k_o}} - 1\right) \left(\frac{1}{\eta_k}\right). \quad (5.4)$$

2.3) temperatūra

$$T_3 = T_2 + \left(\frac{k_o-1}{k_o}\right) \left(\frac{W_2}{R_o}\right). \quad (5.5)$$

3) Pjūvis už degimo kameros

3.1) slėgis

$$p_4 = p_3 \cdot \sigma_{dk} \quad (5.6)$$

čia: σ_{dk} – slėgio atsistatymo degimo kameroje koeficientas, įprastai jo reikšmės būna $0.96 \div 0.98$.

3.2) vidutinis šiluminis degimo kameros talpumas

$$c_{pcp} = 878 + 0.208(T_3 + 0.48T_2). \quad (5.7)$$

3.3) santykinis degalų poreikis

$$q_{deg} = \frac{c_{pcp} \cdot (T_4 - T_3)}{\eta_{deg} \cdot H_U}. \quad (5.8)$$

čia: η_{deg} – sudegimo pilnumo koeficientas, kurio reikšmė skaičiavimuose įprastai priimama 0.99,

H_U – mažiausias degalų koringumas, aviaciniam žibalui priklausomai nuo markės svyruoja nuo 42500 iki 43500 kJ/kg.

4) Pjūvis už turbo generatoriaus turbinos

4.1) slėgio kritimo turbo generatoriaus turbinoje koeficientas

$$\pi_{tg} = 1 / \left(1 - \frac{W_3}{\frac{k_d}{k_d-1} \cdot R_d \cdot T_4 \cdot \eta_{tg}} \right)^{\frac{k_d}{k_d-1}}. \quad (5.9)$$

čia: η_{tg} – turbo generatoriaus pilnas naudingumo koeficientas, kurio reikšmės skaičiavimuose galima priimti $0.88 \div 0.92$.

4.2) slėgis

$$p_5 = \frac{p_4}{\pi_{tg}}. \quad (5.10)$$

4.3) darbas

$$W_4 = \frac{W_3}{(1+q_{deg}) \cdot (1-\delta_{aus}) \cdot \eta_{mtg}}. \quad (5.11)$$

čia: η_{mtg} – mechaninis turbo generatoriaus naudingumo koeficientas, kurio reikšmės skaičiavimuose įprastai $0.98 \div 0.99$.

4.4) temperatūra

$$T_5 = T_4 - \frac{W_4}{\frac{k_d}{k_d-1} \cdot R_d}. \quad (5.12)$$

5) Pjūvis už laisvosios jėgos turbinos

Dažniausiai priimama tai kad tokio tipo varikliuose plėtimasis vyksta iki aplinkos arba labai jam artimo slėgio. Slėgio mažėjimo koeficientą už laisvosios jėgos turbinos pirmo priartėjimo skaičiavimuose apjungia su slėgio mažėjimu išmetimo tūtoje, t.y. abu šie mazgai vertinami kaip vienas.

5.1) slėgis

$$p_{6-7} = p_a. \quad (5.13)$$

5.2) darbas laisvoje jėgos turbinoje

$$W_5 = \frac{k_d}{k_d-1} \cdot R_d \cdot T_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k_d}{k_d-1}}} \right) \cdot \eta_{ljt}. \quad (5.14)$$

čia: η_{ljt} – laisvosios jėgos turbinos pilnas naudingumo koeficientas, jo dydis skaičiavimuose priimamas $0.89 \div 0.96$.

5.3) temperatūra. Priimta laikyti kad

$$T_4 = T_5. \quad (5.15)$$

6) Santykiniai variklio parametrai

6.1) santykinė veleno galia

$$N_{e\ sant} = \frac{W_5 \cdot \eta_{red}}{1000}. \quad (5.16)$$

čia: η_{red} – reduktoriaus naudingumo koeficientas, jo reikšmės $0.988 \div 0.992$.

6.2) oro sanaudos laisvojoje jėgos turbinoje

$$Q_{oro\ ljt} = \frac{N_e}{N_{e\ sant}}. \quad (5.17)$$

6.3) oro sanaudos turbo generatoriaus turbinoje

$$Q_{oro\ tg} = Q_{oro\ ljt} \cdot (1 + q_{deg} - \delta_{aus}). \quad (5.18)$$

6.4) oro sanaudos variklyje

$$Q_{oro} = Q_{oro\ tg} + Q_{oro\ ljt}. \quad (5.19)$$

6.5) savitosios, ekvivalentinės degalų sanaudos

$$C_e = \frac{3600 \cdot q_{deg}}{N_{e\ sant}}. \quad (5.20)$$

Darbo pabaigai studentui reikia sudaryti darbo kūno slėgio ir temperatūros kitimo būdinguose pjūviuose grafikus. Taip pat sudaryti savitųjų ekvivalentinių degalų sanaudų kitimo priklausomai nuo darbo režimo grafiką, bei parašyti trumpas išvadas.

DARBO IŠVADOS

1. Atlikus mažos galios turbo sraigtinių variklių rinkos analizę, nustatytos minėtų variklių poreikių tendencijos, kurias iššaukia vis labiau besivystanti bendroji aviacija ir bepiločiai orlaiviai, kurių gamyboje vis labiau reikalingi mažos galios TSV.
2. Variklių darbo ciklą analizė parodė, kad aviaciniai turbininiai varikliai naudoja paprastą reaktyvinį arba Braitono darbo ciklą. Aviaciniuose varikliuose nėra įdiegti papildomi procesai, gerinantys terminį ciklo naudingumo koeficientą, išskytus forsažo procesą. Daug žadantis turbo sraigtiniuose ir turbo veleniniuose varikliuose yra regeneracijos procesas. Remiantis atliktais tyrimais, galima teigti, kad jis turėtų padidinti terminį ciklo naudingumo koeficientą, o degalų sąnaudas galėtų būti sumažintos iki 30 %. Tačiau regeneracijos proceso konstrukcinis įgyvendinimas variklyje yra problematiškas dėl konstrukcinių ir technologinių procesų, nors regeneracija plačiai naudojama antžeminiuose pramoniniuose turbininiuose varikliuose.
3. Išanalizavus skaičiavimų metodikas, galima teigti, kad jos yra dviejų tipų: a) užduodama pakankamai nedaug pradinių duomenų projektuojamo variklio skaičiavimams atlikti; b) išėtiniais duomenimis pasirenkami įvairūs santykiniai parametrai. Nustatyta, kad: b) atveju, skaičiavimai supaprastėja ir sudaro sąlygas tiksliau įvertinti variklio charakteristikas su iš anksto užduotais parametrais kaip degalų, oro sąnaudos ir t.t; a) atveju, skaičiavimo algoritmas ilgesnis, o rezultatų tikslumas prastesnis.
4. Atlikus nedidelės galios TSV skaičiavimus nustatyta, kad suprojektuoti tubo sraigtinį variklį, kurio galia 350 kW ir masė iki 100 kg, yra realu, pasitelkus pažangias gamybos technologijas šilumokaičio gamyboje, įgyvendinus regeneracijos procesą. Pasiūlyta TSV variklio konstrukcinė schema.
5. Parengta turbo sraigtinių variklių skaičiavimo užduoties atlikimo metodika aviacijos inžinerijos 3-čio kurso bakalauro studijų programos studentams. Užduotis yra naudinga įgyjant žinių apie turbininių variklių projektavimo principus, konstrukcijas bei jų ypatybes, santykinų parametru įtaką variklio charakteristikoms.

LITRATŪROS SĄRAŠAS

1. Sanjay et al., “Comparative performance analysis of cogeneration gas turbine cycle for different blade cooling means”, *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 1432–1440;
2. Ashley De S and Sarim Al Zubaidy, “Gas turbine performance at varying ambient temperature”, *Applied Thermal Engineering* 31(2011) 2735e2739;
3. J.W. Baughn, R.A. Kerwin, A comparison of the predicted and measured thermodynamic performance of a gas turbine cogeneration system, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* 109 (1987) 32–38;
4. I.G. Rice, Thermodynamic evaluation of gas turbine cogeneration cycles: Part 1. Heat balance method analysis, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* 109 (1987);
5. R. Bhargava, A. Peretto, A unique approach for thermo-economic optimization of an intercooled, reheated and recuperated gas turbine for cogeneration application, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* 124 (2001) 881–891;
6. S. Basto, H.P. Blanco, Cogeneration system simulation and control to meet simultaneous power, heat and cooling demands, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* 127 (2005) 404–409.
7. M. Bianchi, G.N. Montenegro, A. di Peretto, Cogenerative below ambient gas turbine performance with variable thermal power, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* 127 (2005) 592–598.
8. A. Poullikkas, An overview of current and future sustainable gas turbine technologies *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9 (2005) 409–443.
9. Torbidini, L. and A. Massardo, Analytical Blade Row Cooling Model for Innovative Gas Turbine Cycle Evaluations Supported by Semi-Empirical Air- Cooled Blade Data. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004 126: p. 498-506.
10. Vittal, S., P. Hajela, and A. Joshi, Review of Approaches to gas turbine life management, in *10th AIAA/ISSMO Analysis and Optimization*. 2004,
11. AIAA: Albany, NY. Zifeng Yang and Hui Hu, “An experimental investigation on the trailing edge cooling of turbine blades”, *Propulsion and Power Research* 2012;1(1):36–47;
12. Cun-liang Liu et al., “Film cooling performance of converging slot-hole rows on a gas turbine blade”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010);
13. 5232–5241 Mahmood Farzaneh-Gord and Mahdi Deymi-Dashtebayaz, “Effect of various inlet air cooling methods on gas turbine performance”, *Energy* 36 (2011) 1196-1205;

14. J. H. Horlock (2003), "Advanced Gas Turbine Cycles", F. R. Eng., F.R.S. ELSEVIER SCIENCE Ltd The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX51 GB, UK;
15. Thamer K. Ibrahim et al., "Improvement of gas turbine performance based on inlet air cooling systems: A technical review", International Journal of Physical Sciences Vol. 6(4), pp. 620-627, 18 February, 2011;
16. Ashok D. Rao and David J. Francuz, "An evaluation of advanced combined cycles", Applied energy 102 (2013);
17. 1178–118 Garg, S.; Schadow, K.; Horn, W. *Sensor and Actuator Needs for More Intelligent Gas Turbine Engines*; NASA/TM-2010-216746, NASA: Houston, TX, USA, 2010;
18. Jaw, L.C. Recent Advancements in Aircraft Engine Health Management (EHM) Technologies and Recommendations for the Next Step. In *Proceedings of Turbo Expo 2005: 50th ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress*, Reno-Tahoe, NV, USA, 6–9 June 2005.
19. Spang, H.A.; Corley, R.C. Failure detection and correction for turbofan engine. In *Proceedings of Joint Automatic Control Conference*, San Francisco, CA, USA, 22–24 June 1977; General Electronic Co. No.77CRD159.
20. Simon, D.L. *An Integrated Architecture for On-Board Aircraft Engine Performance Trend Monitoring and Gas Path Fault Diagnostics*; NASA/TM-2010-216358; NASA: Houston, TX, USA, 2011.
21. Pileckas E. Aviaciniai skrydžio valdymo prietaisai ir sistemos; Vilnius „Technika“ 2011;
22. Ahmed F. Ei – Sayed Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines; CRC Press, New York;
23. V. M. Akimov Teoriya i raschet vozdušno – reaktivnykh dvigatelej; Machinostroenye, Moskva, 1987;
24. http://www.turbinesolutiongroup.com/tsg_TP100.htm, Interneto prieiga [peržiūrėta 2018. 05. 27];
25.]: <http://www.lancaironline.net/TP100.htm>, Interneto prieiga [peržiūrėta 2018. 05. 27]
26. https://en.wikipedia.org/wiki/Europrop_TP400#/media/File:Paris_Air_Show_2017_Europrop_TP400.jpg, Interneto prieiga [peržiūrėta 2018. 05.7];
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Europrop_TP400#/media/File:A400M_outer_engine.jpg, Interneto prieiga [peržiūrėta 2018. 05. 27]
28. [https://en.wikipedia.org/wiki/Garrett_TPE331#/media/File:Honeywell_\(Garrett\)_TPE331-14.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Garrett_TPE331#/media/File:Honeywell_(Garrett)_TPE331-14.jpg), Interneto prieiga [peržiūrėta 2018.05. 27];
29. ivchenko-progress.com/wp-content/uploads/2015/10/ai450c.jpg, Interneto prieiga: [peržiūrėta 2018. 05. 27]

31. <https://www.pragaglobal.com/ge-h80-turboprop-engine-by-ge-aviation-czech/>, Interneto prieda [peržiūrēta 2018. 05. 27];
32. http://www.schoepski.com/states/michigan/histmarker/kalamzoo_air_zoo/images/wasp_major.jpg, Interneto prieda: [peržiūrēta 2018.05.27];
33. http://aviationweek.com/site-files/aviationweek.com/files/imagecache/medium_img/uploads/2015/11/geatp3.jpg Interneto prieda:, peržiūrēta 2018.05.27
34. The Jet Engine, Rolls – Royce PLC, Fifth edition, Reprinted 1996 with revisions.